

Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge
mit Schwerpunkt auf der Schadstoffentfrachtung
und dem dezentralen Rückbau



**Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge mit Schwerpunkt
auf der Schadstoffentfrachtung und dem dezentralen Rückbau**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von
Dipl.-Ing. (FH) Sebastian Jeanvré
aus Braunschweig

genehmigt von der Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften der
Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung: 03. Dezember 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists the publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the internet at <http://dnb.dnb.de>.

Vorsitzender der Promotionskommission: Prof. Dr. Inge Wulf

Hauptberichterstatte: Prof. Dr.-Ing. Daniel Goldmann

Mitberichterstatte: Prof. Dr. Heike Y. Schenk-Mathes

D 104

© PAPIERFLIEGER Verlag GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 215
Telemanstraße 1 38678 Clausthal-Zellerfeld
www.papierflieger.eu

Urheberrechtlich geschützt, alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2015

ISBN 978-3-86948-479-2

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der grundlegenden Untersuchung und Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge. In den nächsten 15 Jahren wird ein weltweites Materiallager aus 360.000 - 570.000 t Altflugzeugen zur Verfügung stehen. Davon können ca. 60 % einer stofflichen Verwertung zugeführt und im Sinne der Kreislaufwirtschaft genutzt werden. Die verbleibenden 40 % gliedern sich auf der einen Seite in potenziell wiederverwendbare Hochwertteile (13 %) und auf der anderen Seite in Betriebs- und Reststoffe. Letztere können größtenteils einer energetischen Verwertung zugeführt werden.

Es werden der Aufbau und die verwendeten Materialien in einem Flugzeug beschrieben. Eigene Untersuchungsergebnisse werden mit den Ergebnissen von durchgeführten industriellen Projekten verglichen und vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Identifikation von verwendeten Materialien, die einer stofflichen Verwertung zugeführt werden können, und Gefahrstoffen in Flugzeugen. Das stofflich verwertbare Material setzt sich im Schnitt aus 77 % Al-Legierungen, 12 % Stahl, 4 % Titan, 4 % nichtmetallischen Werkstoffen und 3 % Sonstigen zusammen. Somit besteht ein Großteil der derzeit verwertbaren gewinnbringenden Masse aus Aluminiumlegierungen.

Voraussetzung für eine gesetzeskonforme Verwertung ist die Berücksichtigung aller relevanten Rechtsvorschriften. Hierzu wurden abfallrechtliche Grundlagen und Vorschriften im Altflugzeugrecycling beschrieben. Der Verbund Altflugzeug ist als ein gefährlicher Abfall zu klassifizieren und muss über einen speziell entwickelten Schadstoffentfrachtungs- und Behandlungsprozess für die stoffliche Verwertung vorbereitet werden. Im Rahmen dieses Prozesses sind auch die Möglichkeiten der Unbrauchbarmachung von lebensdauerbegrenzten Bauteilen aus der Luftfahrt zu berücksichtigen. Beim End-of-Life-Management ist letztlich der Lebenszyklus von Flugzeugen und der Übergang zum Altflugzeug zu definieren und zu organisieren.

Vor dem Hintergrund, dass außer Betrieb gestellte Flugzeuge weltweit bevorzugt in ariden Gebieten dezentral geparkt werden, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „Modularisierung des Flugzeugrecyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit“, MORE-AERO, ein

innovatives Konzept entwickelt und erprobt. Damit können Altflugzeuge weltweit durch eine standardisierte mobile Einheit und einen speziell entwickelten technischen Prozess vor Ort bearbeitet werden. Die Flugzeuge bzw. Flugzeugteile werden mit diesem Prozess schrittweise von Schadstoffen entfrachtet, vorzerkleinert, vorsepariert und so transportfähig gemacht. Danach können die einzelnen Stoffströme auf dem Weltmarkt entsprechend geeigneten Verwertungskanälen zugeführt werden.

Der entwickelte Prozess bildet die Basis für die Umsetzung erfolgreicher globaler Flugzeugrecyclingsysteme und legt die Grundlage, um neue Absatzkanäle für Wertstoffströme aus Altflugzeugen zu entwickeln und diese zu versorgen.

Abstract

This paper deals with a fundamental analysis and development of a recycling system for End-of-Life Aircraft. In the next 15 years, a worldwide material pool of 360.000 - 570.0000 tons of end-of-life aircraft will be available, of which approximately 60 per cent could be recycled in terms of a closed substance cycle management. The remaining 40 % of non-recyclable materials are divided into potentially reusable high-quality components (13 %) on the one hand, and residual materials on the other hand, which partially could be utilized energetically.

The layout of the aircraft and the materials used will be described. An introduction of own research results will be made, which will be compared with the results derived from industrial projects. A focus will be laid on the identification of valuable materials and hazardous substances used in aircraft. The valuable secondary raw materials consist on average of 77 % Al alloys, 12 % steel, 4 % titanium, 4 % non-metallic materials and 3 % other materials. A prerequisite for a legally compliant beneficiation process for commercialization of recycling is the due consideration of all relevant legal provisions. All legal bases and regulations for waste disposal in the field of aircraft recycling have been described. The composite End-of-Life Aircraft is to be classified as hazardous waste and has to be prepared for the material recycling in a specially-designed pollutant extraction and treatment process. In the course of the process, the possibilities of deactivation of life-limited components from the aviation industry have to be taken into account. In the end, as far as end-of-life management is concerned, the life-cycle of aircraft and the transition to the End-of-Life Aircraft is to be defined and organized.

Against the background that, worldwide, out-of-service aircraft are preferably parked decentrally in arid areas, the research project "Modularization of Aircraft Recycling through Development and Testing of a mobile Recycling Unit – MORE-AREO" has developed a concept for the depolluting, pre-shredding, pre-separation and rendering transportable of hazardous substances in End-of-Life Aircraft through a globally standardized mobile unit and a specially-designed on-site process in order to feed the single material flows into their appropriate exploitation channels.

This developed process founds the basis for the technical implementation of successful global aircraft recycling systems und uses the option of developing and providing new distribution channels for End-of-Life Aircraft.

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt wurde.

Hattorf, den 5. August 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'S. Jeanvré', is written over a horizontal line.

Sebastian Jeanvré

Vorwort und Danksagung

Eine wissenschaftlich praxisorientierte Arbeit ist nie das Werk eines einzelnen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Projektleiter bei der Keske Entsorgung GmbH in Braunschweig. Mein besonderer Dank gilt dem Geschäftsführer der Keske Entsorgung GmbH, Marc Keske, der die industrielle Umsetzung des Projektes und die Vision zum Flugzeugrecycling im industriellen Maßstab in Deutschland erst möglich gemacht hat. Ich möchte mich für die betriebswirtschaftliche Unterstützung, das Korrekturlesen und das offene Ohr für meine Fragestellung bei der Prokuristin Nina Brose bedanken. Weiterhin geht ein ganz großer Dank an meine Kollegen Nina Roth, Norbert Pape, Alexander Fink, Bernd Schwarz, Enrico Mähnert und Kay Osteroth. Ohne den starken geistigen und körperlichen Einsatz dieser Personen hätten die beschriebenen Projekte nicht realisiert und umgesetzt werden können.

Dank möchte ich ebenfalls allen Mitarbeitern vom IFAD der TU Clausthal aussprechen, die meine Arbeit unterstützt haben. Vielen Dank an Prof. Dr. Daniel Goldmann, dass er trotz seiner zeitintensiven Professur und den zahlreichen Forschungsprojekten immer ein offenes Ohr für meine Fragestellungen und eine fördernde Diskussion hatten. Ich freue mich, dass er die wissenschaftliche Betreuung, Durchsicht der vorliegenden Arbeit und die Berichterstattung übernommen hat. Des Weiteren möchte ich mich für die Möglichkeiten der Veröffentlichung meiner erarbeiteten Ergebnisse über den TK Verlag im Rahmen der Berliner Recycling- und Rohstoffkonferenz bedanken. Weiterhin möchte ich Dipl.-Ing. Christian Duwe für die tolle Zusammenarbeit im Forschungsprojekt und die gemeinschaftlichen Veröffentlichungen mit fruchtbaren Diskussionen und Ergebnissen danken. Ich möchte auch den Dank an die zahlreichen Praktikanten, Diplomanden, Masteranden und wissenschaftlichen Mitarbeiter aussprechen, die einen wesentlichen Anteil zu meiner Arbeit beigetragen haben. Weiterhin möchte ich mich bei Frau Prof. Schenk-Mathes vom Institut für Wirtschaftswissenschaften der TU Clausthal für die Durchsicht und Berichterstattung bedanken.

Meine Arbeit wurde durch das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt „Modularisierung des Flugzeug-Recyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit im

Aerospace-Sektor (MORE-AERO)“ unterstützt. Ich möchte mich bei allen Projektpartnern für die professionelle Durchführung und kompetente Unterstützung des Projektes bedanken. Mein besonderer Dank geht an Norbert Steinkemper und Dr. Glaser von der Süderelbe AG, die wirklich eine tolle Arbeit machen. Weiterhin danke ich Arne Müller von der Stute Logistics (AG & Co.) KG für die logistische Diskussion und die Unterstützung bei der Beantwortung der logistischen Fragestellungen.

Mein Dank gilt auch Prof. Jörg Woidasky von der Fakultät für Technik der Hochschule Pforzheim. Vielen Dank für die wohlwollende fachliche Unterstützung, die Förderung meiner Arbeit und die eröffnete Gelegenheit, meine Ergebnisse zur Schadstoffentfrachtung von Flugzeugen auf nationaler und internationaler Ebene im Rahmen der „European Aircraft Symposien“ zu veröffentlichen.

Ich möchte mich weiterhin bei den Mitarbeitern der Exner Technology GmbH bedanken. Hervorheben möchte ich den Geschäftsführer und authentischen Freigeist Hubertus Exner. Vielen Dank für das Mitteilen der jahrelangen Erfahrungen und die vielen Wochenenden, die ich in der Praxis an der mechanischen Aufbereitungsanlage in Langelsheim mit verschiedensten Versuchen verbringen durfte. Danke auch an Tristan Niewisch von der pdv-software GmbH, Dr. Dieter Schmid von der Volkswagen AG und Prof. Dr.-Ing. Joachim Schmidt von der Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, die mich über die letzten Jahre immer wieder motiviert haben, zielgerichtet an diesem Projekt weiterzuarbeiten. Ein großer Dank für die Förderung meiner Arbeit auch an Rickmer Hatecke von der Metalloy Metalle-Legierungen GmbH, Jürgen Pilarsky, Marijo Zeljko und Gudrun Kutscher von der CRONIMET Holding GmbH.

Ein großer Dank gilt auch der Lufthansa Technik AG in Hamburg. Ich möchte mich für die große Unterstützung der CAMO-Abteilung bedanken. Vielen lieben Dank Jens Weinreich, der es ermöglicht hat eine Handlungsanweisung mit dem Thema „Entwicklung eines exemplarischen Minimumstandards für die Entsorgung von Altflugzeugen beispielhaft an einem Airbus A340-300“ im Maintenance-Bereich in Hamburg zu erarbeiten. Im Besonderen möchte ich mich bei Peter Timmermann bedanken, der uns immer tatkräftig mit seiner Unterstützung und seinem Lufthansa-Netzwerk zur Seite stand. Ich möchte

auch Dr. Strohmeyer für seine intensive fachliche Unterstützung, die technischen Diskussionen und seinen Einsatz für mögliche Folgeprojekte danken.

Mein Dank auch für die belastbaren technischen Informationen Regina Gebhard vom DLR, Paul Reich vom Institut für Flugzeugbau, Jörg Maron von der Sky Line Aviation Service GmbH, Herrn Schäfer und Herrn Janßen von der Firma ACC Columbia, Hermann Nagel von der Firma Aviocon, Jürgen Hampe von der Hampe Luftfahrttechnik und Lutz Müller von der Elbe Flugzeugwerke GmbH. Ich möchte mich weiterhin bei Regina Kohlmeyer vom Bundesumweltamt für die Unterstützung im Abfallrecht bedanken, bei Barbara Reck von der Yale School of Forestry & Environmental Studies aus den USA für die unterstützenden Informationen im Bereich der möglichen verbauten radioaktiven Quellen in Flugzeugen und Torsten Müller für die Unterstützung und Motivation vom Fraunhofer ICT in Karlsruhe. Dank auch an Uwe Berndt von der Bundesstelle für Flugunfalluntersuchung (BFU), der mir die ersten Materialien für meine Strukturuntersuchung zur Verfügung gestellt hat. Vielen Dank an den Künstler Uwe Brandt, der den persönlichen Tagebuchauszug, zur Verfügung gestellt hat.

Last but not least, ein herzlicher Dank geht an meine geduldige und unterstützende Familie, die das Erreichte erst ermöglicht hat.

Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie.

Immanuel Kant

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	4
Erklärung	6
Vorwort und Danksagung.....	7
Inhaltsverzeichnis	12
Abbildungsverzeichnis	16
Tabellenverzeichnis	21
Abkürzungsverzeichnis	24
Begriffserklärungen	30
1 Einleitung.....	1
1.1 Geschichte der Luftfahrt.....	2
1.2 Motivation	4
1.3 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit	5
1.4 Vorgehensweise	6
1.5 Derzeitige Situation.....	9
2 Stand der Technik und Forschung	11
2.1 Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft (PAMELA).....	11
2.2 Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA).....	16
2.3 Clean Sky	20
2.4 Modularisierung des Flugzeug-Recyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit im Aerospace- Sektor (MORE-AERO)	23
2.5 Weltweit agierende Unternehmen im End-of-Life-Management von Flugzeugen	24
2.6 Zusammenfassung und Ausblick zur Forschungslandschaft	27
3 Abfallrechtliche Grundlagen und Vorschriften im Altflugzeugrecycling.....	29
3.1 Verordnungen und Richtlinien auf europäischer Ebene.....	29
3.1.1 Europäische Abfallrahmenrichtlinie Waste Framework Directive	29
3.1.2 Europäisches Abfallverzeichnis, gefährliche Abfälle	30

3.2	Gesetze auf nationaler Ebene	31
3.2.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	32
3.2.2	Abfallrechtliche Nachweisführung in Deutschland	34
3.2.3	Altfahrzeugverordnung.....	36
3.2.4	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	37
3.2.5	ATEX Betriebsrichtlinie 1999/92/EG	38
3.2.6	Atomgesetz, Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung	38
3.2.7	Arbeitssicherheit.....	39
4	Einteilung von Fluggeräten.....	40
4.1	Einteilungsmöglichkeiten nach Gewicht.....	41
4.2	Einteilungsmöglichkeiten nach Größe.....	44
5	Aufbau von Flugzeugen	47
5.1	Konstruktiver Aufbau von Flugzeugen	47
5.2	Struktur	50
5.2.1	Rumpf	50
5.2.2	Flügel	56
5.2.3	Flügelmittelkasten (Wing center box)	59
5.2.4	Leitwerke.....	60
5.2.5	Fahrwerke	62
5.3	Triebwerksanlage.....	63
5.4	Ausrüstung.....	66
5.5	Bauteilkennzeichnung über Partnummern	67
6	Eingesetzte Materialien im Flugzeugbau	70
6.1	Überblick über verwendete Werkstoffe	70
6.2	Verbindungs- und Fügetechniken	71
6.3	Aluminiumlegierungen	71
6.4	Weiterentwicklung von Aluminiumlegierungen.....	75
6.5	Stahllegierungen	76
6.6	Titanlegierungen	77
6.7	Kunststoffe	78
6.8	Verbundwerkstoffe	81
6.9	Gefahr- und Schadstoffe bei der Verwertung von Altflugzeugen ..	86
7	Produktlebenszyklus von Flugzeugen	90

7.1	Lebenszyklus kommerzieller Transportflugzeuge am Beispiel der Airbus A320 - Familie	90
7.2	Technische und wirtschaftliche Bewertung von Flugzeugen in Abhängigkeit vom Alter	93
8	Rahmenbedingungen und Prozessbeschreibung für den Rückbau von Altflugzeugen.....	96
8.1	Grundlegende Prozessentwicklung zur Entfernung von Gefahr- und Schadstoffen	96
8.2	Vorbereitung der Demontage.....	99
8.2.1	Qualifikation und Schulung der Mitarbeiter	99
8.2.2	Rückbaufläche	100
8.3	Annahme und Erfassung	106
8.4	Trockenlegung	106
8.4.1	Mobile Enttankung von flüssigen Betriebsmitteln der Tanksektionen von Altflugzeugen	107
8.4.2	Tankbelüftung von Altflugzeugen	112
8.5	Demontage von Hochwertteilen und Schadstoffentfrachtung	115
8.6	Vorzerkleinerung eines Altflugzeugs.....	123
8.7	Verhinderung des In-den-Verkehr-Bringens von Teilen zweifelhafter Herkunft	129
8.8	Ausblick auf zukünftige Gesetzesgrundlagen für die Altflugzeugverwertung und Vorschläge zur Vorgehensweise	132
9	Technische Umsetzung des Rückbauprozesses in Form einer mobilen Einheit	134
9.1	Notwendigkeit eines mobilen Ansatzes zum Altflugzeugrecycling	134
9.2	Planungs- und Entwicklungskosten für die mobile Einheit	139
9.3	Container Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung	141
9.4	Container Vorzerkleinerung	142
9.5	Verbringung und logistische Umsetzung der mobilen Einheit und des vorzerkleinerten Materials	145
10	Aufbereitungsmöglichkeiten eines Altflugzeugs	149
10.1	Mögliche Vorsortierung an der Rückbaufläche	149
10.2	Stand der Technik in der Aufbereitung von Altflugzeugen	150
10.3	Qualitätsmaßstab auf Basis der DIN EN 13920 und der Einsatz in Schmelzöfen	155
10.4	Beschreibung derzeitiger Absatzwege des aufbereiteten Materiallagers von Altflugzeugen	159
10.4.1	Aluminium	159

10.4.2	Stahl- und Superlegierungen	159
10.4.3	Titan	161
10.4.4	Kohlefaserverbundwerkstoffe	162
10.5	Verfahrenstechnische Perspektiven in der Aufbereitung	162
11	Darstellung des potenziellen weltweiten Materiallagers von Altflugzeugen	164
11.1	Anfallstellen von Altflugzeugen	164
11.2	Darstellung des Materiallagers mit einem gemittelten Massebezug von Altflugzeugen	166
11.3	Monetäre Bewertung des Materials auf Basis des zur Verfügung stehenden Materiallagers in einem Altflugzeug	171
11.3.1	Aluminiumlegierungen	171
11.3.2	Edelstahl und Superlegierungen	173
11.3.3	Titanlegierungen	174
11.4	Beispielhafte Bewertung anhand eines Altflugzeugs	175
12	Darstellung der Wertschöpfungskette und Entwicklung einer Konzeptidee	178
12.1	Gründe für die Außerdienststellung von Flugzeugen	178
12.2	Vorstellung der entwickelten Konzeptidee	181
12.3	Darstellung der Wertschöpfungskette bei der Verwertung von Flugzeugen	183
12.4	Betrachtung verschiedener End-of-Life Szenarien	186
12.5	Beispielkalkulation Rückbau eines Airbus A300 - B4F	189
13	Zusammenfassung und Ausblick	193
	Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster	197
	Anhang B: Verwendete Legierungen im Flugzeugbau	207
	Lebenslauf	210
	Literaturverzeichnis	211

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarische kommerzielle Boeing Flugzeuge - Trend der Werkstoffanteile bei unterschiedlichen Flugzeugmustern [9]	2
Abbildung 2: Zeitstrahl Entwicklung Flugzeuge (eigene Darstellung).....	3
Abbildung 3: Darstellung des Potenzials außer Dienst gestellter Flugzeuge 2013 bis 2032 [13]	4
Abbildung 4: Definition Altflugzeug (eigene Darstellung)	5
Abbildung 5: Durchgeführte Demontageprojekte von Altflugzeugen mit entsprechenden Gesamtmassen (eigene Darstellung)	7
Abbildung 6: Entscheidungsmatrix PAMELA [16].....	13
Abbildung 7: Massendarstellung Airbus A300 - B4 PAMELA [17].....	14
Abbildung 8: Materialzusammensetzung in Masseprozent eines Airbus A300- B4 (eigene Darstellung)	15
Abbildung 9: AFRA Logo [18].....	16
Abbildung 10: Logo AFRA Zertifizierung [18]	19
Abbildung 11: Mitglieder Clean Sky [19]	20
Abbildung 12: Arbeitsfelder Clean Sky [19].....	21
Abbildung 13: Arbeitspakete MORE-AERO [23]	24
Abbildung 14: Abfallhierarchie auf Basis der WFD [27].....	30
Abbildung 15: Mögliche Kreisläufe im Altflugzeugbereich entsprechend der Abfallhierarchie (eigene Darstellung)	34
Abbildung 16: Übersicht der Fluggeräte [41]	41
Abbildung 17: Beispielhafte Kennzeichnung Airbus A320-232 D-ATRA DLR [47].....	44
Abbildung 18: Größenvergleich Business-Jet, Narrow Body und Wide Body [48].....	45
Abbildung 19: Flugzeug unterteilt in Konstruktionshauptgruppen und Konstruktionsgruppen [41]	48

Abbildung 20: Airbus A300 Rumpfunterschale mit Spanten [61]	50
Abbildung 21: Beispielhafte Flugzeugstruktur Airbus A300 - B4 (eigene Darstellung).....	51
Abbildung 22: Rumpfsektionen Airbus A340 [62]	52
Abbildung 23: Zonen eines Flugzeugrumpfs [62]	53
Abbildung 24: Querschnitt durch einen Flugzeugrumpf [63]	54
Abbildung 25: E&E Compartment mit Verkabelung eines Airbus A340 - 300 (eigene Darstellung).....	54
Abbildung 26: Spantenplan eines Airbus A340 [62]	55
Abbildung 27: Rippenstruktur eines Flügels für einen Airbus A340 [65].....	57
Abbildung 28: Flügelmittelkasten Airbus A340 [65]	59
Abbildung 29: Anordnung der Leitwerke am Beispiel Airbus A330 [66]	61
Abbildung 30: Kritische Lagerung von Boeing B747 Fahrwerken in der Nähe von Kuala Lumpur (eigene Darstellung).....	63
Abbildung 31: Beispielhaft verwendete Werkstoffe in einem Zweistrom- Zweiwellentriebwerk [69].....	65
Abbildung 32: Systematik zur Definition von Partnummern des Flugzeug- herstellers Airbus [70]	67
Abbildung 33: Einteilung von Werkstoffen und Betriebsmitteln im Flugzeugbau, vgl. [41].....	70
Abbildung 34: Schematischer Aufbau der verschiedenen Aluminiumlegierungen [73].....	73
Abbildung 35: Aufbau einer Flugzeugkabine am Beispiel einer Boeing B747 (eigene Darstellung).....	81
Abbildung 36: Vergleich des Aufbaus einer Querruderstruktur am Beispiel der Lockheed L-1011 TriStar [64].....	82
Abbildung 37: Bereiche des Flugzeugs aus Verbundwerkstoffen nach ARM am Beispiel des Airbus A340-200/-300 [80]	83

Abbildung 38: Triebwerksverkleidung aus einem Aluminium-Sandwichmaterial [9].....	84
Abbildung 39: Fußbodenstruktur und freigelegte Kabine eines Airbus A340 (eigene Darstellung).....	85
Abbildung 40: Aircraft Rescue and Fire Fighting Chart am Beispiel Airbus A340 [82].....	89
Abbildung 41: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel der Airbus A320 - Familie [14].....	91
Abbildung 42: Recyclingprozess für Altflugzeuge (eigene Darstellung)	98
Abbildung 43: 3-Schicht Bodenschutz für Rückbauprojekte (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 44: Abgegrenzter Sicherheitsbereich mit Bauzaunelementen zum Auslösen einer Rettungsinsel (eigene Darstellung)	103
Abbildung 45: Sicht- und Verwehungsschutz mit Wing-Docks (eigene Darstellung).....	104
Abbildung 46: Empfohlene Rückbaufläche auf Basis ARM [91].....	105
Abbildung 47: Typische Be- und Enttankung am Beispiel einer Boeing B747 - F [95].....	108
Abbildung 48: Restentleerung eines Hydraulikbehälters (eigene Darstellung)	109
Abbildung 49: Mobile Enttankungsanlage für Kraftstoffe und Betriebsöle mit Lenkhubwagen (eigene Darstellung)	112
Abbildung 50: Belüftung der Tanksektionen des Tragflügels über Verflüchtigung des Kerosins durch geöffnete Mannlochdeckel beispielhaft an einem Airbus A340B4 – 200 F (eigene Darstellung).....	113
Abbildung 51: Geschlossene Entlüftung der Tanksektionen eines Airbus A310 - 300 mit unterstützender Belüftung in einer Wartungshalle (eigene Darstellung)	114
Abbildung 52: Messung von potenziell explosionsfähigen Atmosphären in einem Tragflügel (eigene Darstellung)	115

Abbildung 53: Ausbau eines GENx Triebwerks von einer Boeing B747-8 (eigene Darstellung).....	116
Abbildung 54: Airbus A300 - B4 - 200 Cockpit mit ausgebauter Avionik (eigene Darstellung).....	117
Abbildung 55: Ausbau der Isolierung der Flugzeugkabine eines Airbus A300B4-200 (eigene Darstellung).....	118
Abbildung 56: Messung auf potenzielle Strahlenquellen bei einem Triebwerk mit einem Geiger-Müller-Zählrohr (eigene Darstellung)	120
Abbildung 57: Absetzen einer Boeing B737 - 300 von den Aircraft Jacks auf eine Ablagekonstruktion aus Holz (eigene Darstellung).....	123
Abbildung 58: Abnahme des Seitenleitwerks Airbus A300 - B4 (eigene Darstellung).....	124
Abbildung 59: Vorzerkleinerung von Altflugzeugsegmenten mittels eines mobilen Shredders (eigene Darstellung).....	126
Abbildung 60: Direkte Beladung eines Abrollcontainers durch einen mobilen Shredder (eigene Darstellung)	127
Abbildung 61: Vorzerkleinerung eines Tragflügels mit zwei Mobilbaggern (eigene Darstellung).....	128
Abbildung 62: Vorzerkleinerung Fahrwerk und Center-Wing-Box (eigene Darstellung).....	129
Abbildung 63: Empfohlener Ablauf Unbrauchbarmachung [103].....	131
Abbildung 64: Geparkte Militärflugzeuge am Standort Tucson 309 AMARG, Arizona, USA (eigene Darstellung)	135
Abbildung 65: Liste von Staaten mit Luftfahrtunternehmen, deren Luftfahrtbetrieb in der EU untersagt ist [110].....	137
Abbildung 66: Mobile Einheit Altflugzeugrecycling Keske Entsorgung GmbH [115].....	139
Abbildung 67: Darstellung Containereinheit Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung [116]	142
Abbildung 68: Darstellung Containereinheit Vorzerkleinerung [116]	143

Abbildung 69: Logistisches Prozessfließbild für die mobile Einheit und den Sekundärrohstoff des Altflugzeugs [118].....	147
Abbildung 70: Aufbereitungsverfahren für Altflugzeuge in Anlehnung an die konventionelle KFZ-Aufbereitung (eigene Darstellung).....	151
Abbildung 71: Shredderanlagen in Deutschland [124]	153
Abbildung 72: Ein- und Ausgang der geparkten Flugzeuge an Flughäfen [130]	165
Abbildung 73: Lokalisierte Flugzeuge weltweit (eigene Darstellung).....	167
Abbildung 74: Massendarstellung Flugzeug und Anfallstellen Part 145 MRO-Werkstätten (eigene Darstellung).....	168
Abbildung 75: Aluminiumpreisentwicklung 1989 - 2014 [137]	172
Abbildung 76: Nickelpreisdarstellung 1989 - 2014 [139]	174
Abbildung 77: Generische Darstellung von Gewinn und Betriebskosten eines Flugzeugs über die Jahre [140].....	179
Abbildung 78: Konzeptidee für den Umgang mit Flugzeugen im End-of-Life-Management (eigene Darstellung)	182
Abbildung 79: Entwicklung von Triebwerks- und Flugzeugwerten über die Jahre [140]	184
Abbildung 80: Wertschöpfungskette bezogen auf die Masse eines Flugzeugs [141]	185
Abbildung 81: Prozessdarstellung alternativer Verwertungsszenarien von Flugzeugen im End-of-Life Management (eigene Darstellung) ..	186

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auszug aus Inhaltsverzeichnis BMP 3.1 für Demontage- und Recycling-Unternehmen:.....	18
Tabelle 2: ITD Arbeitsfelder [19]	21
Tabelle 3: Auflistung von weltweit agierenden Unternehmen im End-of-Life-Management von Flugzeugen [24].....	26
Tabelle 4: Beispiel EWC Abfallschlüsselnummer anhand eines Altfahrzeugs ..	31
Tabelle 5: Nachweisführung für gefährliche Abfälle	36
Tabelle 6: Einteilung von Flugzeugen nach Verkehrszulassung (gewichtsbezogen) [45]	42
Tabelle 7: Kennzeichnung von anderen Luftfahrzeugen [45]	43
Tabelle 8: Typische Wide-Body Kenngrößen [49]	45
Tabelle 9: Für die Rumpfstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugzeugmuster [64].....	56
Tabelle 10: Für die Flügelstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugzeugmuster [64].....	58
Tabelle 11: Für die Leitwerkstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugmuster [64]	61
Tabelle 12: Komponenten der Triebwerksanlage von Flugzeugen DIN 9020 Teil 2 [51]	64
Tabelle 13: Beispielhaft verwendete nickelbasis- und rheniumhaltige Superlegierung im Triebwerksbereich [67]	64
Tabelle 14: Standardausrüstung von Flugzeugen DIN 9020 Teil 2 [51]	66
Tabelle 15: Beschreibung der dreistelligen Baugruppen.....	69
Tabelle 16: Beispielhaft verwendete Al-Legierungen im Flugzeugbau auf Basis prozentualer Anteile [75]	74
Tabelle 17: Beispielhafte Al-Li Legierungen im Flugzeugbau [76].....	75
Tabelle 18: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Stahlsorten (Stahllegierungen) [64].....	77

Tabelle 19: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Titanwerkstoffe [41]	78
Tabelle 20: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Kunststoffe [41].....	79
Tabelle 21: In der Kabinenausrüstung eines Flugzeugs verwendete Kunststoffbauteile [79].....	80
Tabelle 22: Instandhaltungsereignisse [41]	92
Tabelle 23: Auflistung von flüssigen Betriebsmitteln in Altflugzeugen mit AVV-Nummer	110
Tabelle 24: Beispielhaft verwendete Masse von abgereichertem Uran als Wolfram Substitut [100].....	119
Tabelle 25: Auflistung von gefährlichen Abfällen in Altflugzeugen mit zugehöriger AVV-Nummer bzw. rechtlicher Grundlage.....	121
Tabelle 26: Auflistung weiterer Abfallgruppen in Altflugzeugen mit AVV- Nummer	122
Tabelle 27: Kostenabschätzung für den Überführungsflug eines Airbus A340 - 300 mit 10 Stunden Flugzeit und anschließend 12 Wochen Parken in den USA [109].....	136
Tabelle 28: Verwendete 20 Fuß Standardcontainer.....	138
Tabelle 29: Kalkulation der mobilen Einheit	140
Tabelle 30: Abfallbezeichnung	148
Tabelle 31: Potenzielle Altflugzeug-Aluminiumlegierungen ohne Vorsortierung [75]	150
Tabelle 32: Potenzielle Altflugzeug-Aluminiumlegierungen über eine Vorsortierung von Rumpf und Flügel [75].....	150
Tabelle 33: Unterschiedliche Shreddertechnologien [123]	152
Tabelle 34: Zusammenfassung der verwendeten Legierungen in Flugzeugen	156
Tabelle 35: Auszug der chemischen Zusammensetzung von Al-Legierungen nach DIN EN 13920	158
Tabelle 36: Gemittelttes Materiallager Altflugzeuge	170
Tabelle 37: Preisrechercheergebnisse Aluminium, Stand 21.08.14 [138]	173

Abkürzungsverzeichnis

A

A/C	Aircraft / Flugzeug
ADR	Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route
AFRA	Aircraft Fleet Recycling Association
äbnl.	ähnlich
AMARG	309th Aerospace Maintenance and Regeneration Group
AMM	Aircraft Maintenance Manuals
a. n. g.	anderweitig nicht genannt
APU	Auxiliary Power Unit
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ARFC	Aircraft Rescue and Fire Fighting Chart
ARM	Aircraft Recovery Manual
ATA	Air Transport Association
ausg.	ausgenommen
AtG	Atomgesetz
AvGas	Aviation Gasoline
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
B	
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung
BDLI	Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V.
BDSV	Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling-und Entsorgungsunternehmen e.V.
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
BMP	Best Management Practice
bzgl.	bezüglich
bspw.	beispielsweise

bzw.	beziehungsweise
C	
ca.	circa
CCC	Crash Crew Charts
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon fiber reinforced plastic
cm	Zentimeter
CMM	Components Maintenance Manual
D	
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	
E & E Compartment	Electronic and Equipment Compartment
EAK	Europäischer Abfallartenkatalog
EASA	European Aviation Safety Agency
Efb	Enstorgungsfachbetrieb
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
evtl.	eventuell
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EWC	European Waste Catalogue
F	
Fa.	Firma
FAR	Federal Aviation Regulations (US-Bundesluftfahrtbehörde)
FCKW	Fluorkohlenwasserstoff
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
HalonVerbV	Halon Verbots-Verordnung
G	
g	Gramm

Gew. %	Gewichtsprozent
Genx	General Electric next-generation
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GFRP	Glass-fiber reinforced plastic
ggf.	Gegebenenfalls
GLARE	Glass-fibre reinforced Aluminium
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
H	
h	Stunde
HPC	High Pressure Compressor
HPT	High Pressure Turbine
I	
IBC	Intermediate Bulk Container
ILT	Institut für Lasertechnik, Fraunhofer
IMO	International Maritime Organization
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
IFAD	Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik, TU Claustha
IPC	Illustrated Parts Catalogue
J	
JAR	Joint Aviation Requirements
K	
k.A.	keine Angabe
kg	Kilogramm
km	Kilometer
km/h	Kilometer pro Stunde
KMF	Künstliche Mineralfaser
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz

Kfz.	Kraftfahrzeug
kW	Kilowatt
L	
LBA	Luftfahrt-Bundesamt
Lfz.	Luftfahrzeug
LIBS	Laser-Induced Breakdown Spectroscopy
LKW	Lastkraftwagen
LLP	Life limited Part
LLT	Lehrstuhl für Lasertechnik, RWTH Aachen
LPC	Low Pressure Compressor
LPT	Low Pressure Turbine
LRE	List of Radioactive and Hazardous elements, Airbus
LME	London Metal Exchange
LuftSiG	Luftsicherheitsgesetz
LuftSiSchulV	Luftsicherheits- Schulungsverordnung
M	
m	Meter
max.	maximal
Ma.- %	Masseprozent
Mg	Magnesium
Mio.	Million/Millionenen
min.	minimal
mind.	mindestens
MJ	Megajoule
mm	Millimeter
MORE-AERO	Modularisierung des Flugzeug- recyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit
MSN	Manufacturer Serial Number

MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
MSG	Maintenance Steering Group
MTOW	Maximum Take-off Weight
N	
NE-Metall	Nichteisenmetall
O	
OCCM	On-Condition- or Condition-Monitored-Components
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
OEM	Original Equipment Manufacturer (engl. Erstausstatter)
P	
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PKW	Personenkraftwagen
PEP	Produktionsentstehungsprozess
PS	Pferdestärken
Psi	Pound-force per square inch
Pepreg	preimpregnated fibres
PM	Produkt-Mission
R	
Ra	Radium
RAT	Ram Air Turbine (engl. Staudruckturbine)
RFA	Röntgenfluoreszenz-Analysatoren
S	
SDB	Sicherheitsdatenblatt
sog.	Sogenannten
SLF	Shredderleichtfraktion
SMS	Sicherheitsmanagementsysteme
SR	Shredderrückstände
SRM	Structural Repair Manual
SMS	Sicherheitsmanagementsysteme

SOP	Start of PRODUCTION
SSF	Shredderschwerfraktion
SUP	Suspected Unapproved Parts
T	
Task	(engl. Task: Aufgabe)
t	Tonne entspricht Megagramm
Th	Thorium
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
TEM	Illustrated Tool and Equipment Manual
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
U	
U	Uran
u. a.	unter anderem
UdSSR	Union der Sozialistischen Sowjetrepubliken
UEG	untere Explosionsgrenze
UN	United Nations
UN-Nummer	Stoffnummer für gefährliche Stoffe
UNS-Nummer	Unified Numbering System for Metals and Alloys
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
V	
vgl.	vergleiche
W	
WBM	Weight and Balance Manual
X	
XRF-Sortierung	Röntgenfluoreszenz-Sortierung
XRT-Sortierung	Röntgentransmission-Sortierung
Z	
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
zzgl.	zuzüglich

Begriffserklärungen

Andienungspflicht:

„An die Entsorgung von gefährlichen Abfällen (sog. Sonderabfälle) werden besondere rechtliche Anforderungen gestellt. Daher wurde in den meisten Bundesländern eine Andienungs- oder Überlassungspflicht für Sonderabfälle zur Beseitigung eingeführt; d. h. Sonderabfälle, die z. B. aufgrund ihres Schadstoffgehalts eine Gefahr für die Allgemeinheit darstellen und daher umweltverträglich beseitigt werden müssen, sind den hierfür zuständigen Landesgesellschaften zu überlassen (Überlassungspflicht) oder anzudienen (Andienungspflicht). Angediente Sonderabfälle werden von der jeweiligen Landesgesellschaft einer geeigneten Abfallentsorgungsanlage zugewiesen“ [1].

ATA:

„Ein Carnet ATA (Admission Temporaire / Temporary Admission) dient in erster Linie der vorübergehenden abgabenfreien Einfuhr von Gebrauchsgütern im internationalen Handel und in international kultureller Tätigkeit. Die hauptsächlichen Anwendungsgebiete des Carnets ATA sind Handelsmessen mit internationaler Beteiligung. Grundsätzlich ist die Abfertigung zur vorübergehenden einfuhrabgabenfreien Einfuhr in das Ausstellungsland nur mit Hinterlegung der Einfuhrabgaben (in voller Höhe) in bar möglich und kann nicht formlos geschehen. Dabei sind die jeweils geltenden einzelstaatlichen Rechtsbestimmungen einzuhalten. Mit einem Carnet ATA wird dieses Verfahren wesentlich erleichtert, vereinheitlicht und aufwändige Abfertigungsschritte, wie die Ermittlung der Höhe der eventuellen Einfuhrabgaben oder die Hinterlegung der Sicherheit in der Landeswährung, werden vermieden“ [2].

Chargierfähigkeit:

Unter chargierfähig werden vorzerkleinerte Bauteile mit Abmaßen $\leq 50 \times 50 \times 150$ mm verstanden. Wenn die vorzerkleinerten Bauteile größer angeliefert werden, sind in der Regel weitere Zerkleinerungskosten zu erwarten [3].

EASA:

„European Aviation Safety Agency definiert einheitliche Qualitätsstandards für die Luftfahrtunternehmen in den Staaten der Europäischen Union. Die Bestimmungen der EASA gehen aus den Anforderungen der JAR (Joint Aviation Requirements) hervor und sind für die Instandhaltungsbetriebe der Luftfahrt sowie für die Ausbildung ihrer Mitarbeiter maßgeblich. Sie werden von den nationalen Behörden und den ihnen angeschlossenen Staaten umgesetzt, in Deutschland vom Luftfahrt-Bundesamt“ [4].

EASA Annex 1 (Part-M):

„Definiert den Begriff Lufttüchtigkeit, also die Betriebssicherheit von Luftfahrzeugen. Er beschreibt z. B. wer die Lufttüchtigkeit sicherstellen muss und welche Organisationen Maßnahmen zur Instandhaltung durchführen dürfen. Der Betreiber kann die zur Instandhaltung nötigen Arbeiten selbst durchführen, wenn er als zugelassener Instandhaltungsbetrieb gemäß „Part-145“ gilt. Andernfalls muss, er mit der Instandhaltung einen zugelassenen Betrieb betrauen, der ihm für die durchgeführten Arbeiten Freigabebescheinigungen ausstellt“ [5].

EASA Annex 2 (Part-145):

„Anforderungen an Instandhaltungsbetriebe (Maintenance Organization Approvals). Legt z. B. fest, welche Voraussetzungen ein Instandhaltungsbetrieb erfüllen muss um eine Zulassung zur Instandhaltung von Luftfahrzeugen und Luftfahrzeugbauteilen zu erhalten. Instandhaltungsarbeiten am Luftfahrzeug oder an einem Luftfahrzeugbauteil dürfen nur von einem Betrieb durchgeführt werden, der selbst gemäß EASA Annex 2 (Part-145) zugelassen ist oder das Qualitätssicherungssystem eines zugelassenen Instandhaltungsbetriebes nutzt. Eine Freigabebescheinigung (Certificate of Release to Service) nach Arbeiten am Luftfahrzeug oder an einem Luftfahrzeugbauteil darf nur ein Instandhaltungsbetrieb ausstellen. Die Instandhaltungsarbeiten und Prüfaufgaben am Luftfahrzeug dürfen in einem Betrieb der selbst eine Zulassung gemäß EASA Annex 2 (Part-145) besitzt, von jeweils dafür qualifiziertem Personal durchgeführt werden. Die Ausstellung einer Freigabebescheinigung muss jedoch durch freigabeberechtigtes Personal (Certifying Staff) erfolgen.“ [5].

EASA Annex 3 (Part-66):

„Beschreibt die Anforderungen an das freigabeberechtigte Personal (Certifying Staff) in genehmigten Instandhaltungsbetrieben, sowie die Voraussetzungen zum Erwerb und Erhalt dieser Berechtigung. Benötigt wird eine Aircraft Maintenance Licence (AML), die nach erfolgreicher Ausbildung durch die Luftfahrtbehörde ausgestellt wird. Die verschiedenen Kategorien der AML geben die Tätigkeitsbereiche und Verantwortlichkeiten wieder. Außerdem ist eine betriebliche Berechtigung nach betriebsinterner Einweisung erforderlich. Sie ist nur für den ausstellenden Betrieb gültig“ [5].

Gemeinschaftswaren:

„Grundsätzlich gelten alle im Zollgebiet der Gemeinschaft befindlichen Waren gemäß Art. 313 Abs. 1 Zollkodex-Durchführungsverordnung (ZK-DVO) als Gemeinschaftswaren, solange nicht der Nachweis erbracht wird, dass es sich um Nichtgemeinschaftswaren handelt.

Gemeinschaftswaren sind Waren,

- die vollständig im Zollgebiet der Gemeinschaft gewonnen oder hergestellt wurden oder
- die aus nicht zum Zollgebiet der Gemeinschaft gehörenden Ländern oder Gebieten eingeführt und in den zollrechtlich freien Verkehr übergeführt wurden oder
- die im Zollgebiet der Gemeinschaft aus Waren gewonnen oder hergestellt wurden, die aus nicht zum Zollgebiet der Gemeinschaft gehörenden Ländern oder Gebieten eingeführt und in den zollrechtlich freien Verkehr der Gemeinschaft übergeführt oder aber teils aus solchen Waren und teils aus vollständig im Zollgebiet der Gemeinschaft gewonnenen oder hergestellten Waren gewonnen oder hergestellt wurden.

Nichtgemeinschaftswaren sind Waren, die

- nicht vollständig im Zollgebiet der Gemeinschaft gewonnen oder hergestellt wurden oder
- aus nicht zum Zollgebiet der Gemeinschaft gehörenden Ländern oder Gebieten eingeführt und nicht in den zollrechtlich freien Verkehr übergeführt wurden“ [6].

Kommunalität:

„In vielen Bereichen eines Flugzeugs findet man die Anwendung der sogenannten Kommunalität wieder. Das bedeutet, dass Systeme verschiedener Flugzeugtypen identisch sind, um dadurch Kosten einzusparen. So ist etwa der Airbus A340 eng verwandt mit dem Airbus A330. Gegenüber dem zweistrahligen Airbus A330 sind die Tragflächen im Bereich der äußeren Triebwerke verstärkt. Viele weitere Baugruppen sind mit denen des Airbus A330 identisch. Die Avionik ist im Wesentlichen die gleiche, wie beim Airbus A330 und der Airbus A320-Familie. Die CFM-International-CFM56-Triebwerke der beiden ersten Versionen Airbus A340-200 und -300 werden auch bei der Boeing B737 und der Airbus A320-Familie eingesetzt. Außerdem ist das Cockpit mit dem der A320-Familie und dem A330 gleich und weist mit dem von Airbus A350 und Airbus A380 große Ähnlichkeiten auf. Dadurch werden der Umschulungsaufwand der Piloten und die Einarbeitungszeit für Wartungstechniker verringert, was Kosten reduziert. Ebenfalls kommt es zu Synergieeffekten bei der Einlagerung von Ersatzteilen“ [7].

Narrow Body:

Dieses ist ein Verkehrsflugzeug von einem Rumpfdurchmesser von 3-4 Metern und nur einem Gang (Single-aisle) zwischen den Fluggastsitzreihen.

Raffschrott:

Raffinationsmetall (z. B. elektrolytische Raffination oder Zonenschmelzverfahren) Substitut aus gebrauchten Metallschrott (altes und/oder oxidiertes Metall nach dem Gebrauch, kein Neuschrott)

Storage / Prolonged Parking:

„Die Maßnahmen für ein "Storage" bzw. "Prolonged Parking" sind sehr viel umfangreicher als bei einer kurzfristigen Stilllegung. Allein für die Deaktivierung eines Flugzeugs müssen hier durchschnittlich 300 Arbeitsstunden aufgewendet werden. Für die periodischen Kontrollen gibt es verschiedene Intervalle mit unterschiedlich aufwändigem Vorgehen. Die "Storage Procedure" beinhaltet zunächst im Wesentlichen die Maßnahmen, die auch für das kurzfristige Parken erforderlich sind. Darüber hinaus werden umfangreiche Konservierungsarbeiten vorgenommen: Die Flight Controls werden abgeschmiert, alle ungeschützten

Aluminium- und Stahlteile an der Flugzeug-Außenhaut werden mit Korrosionsschutz behandelt.

Weiterhin erhalten beim "Storage" die Triebwerke und die APU eine Konservierungs-Beschichtung, bevor hier die Schutzdeckel aufgesetzt werden. Die Tanks werden zu 90 % gefüllt, um ebenfalls Korrosion zu verhindern. Dem Kerosin wird außerdem eine spezielle Schutzflüssigkeit beigemischt. Das Flüssigkeits-Niveau der Hydraulik-Systeme wird abgesenkt, das Fahrwerk wird eingefettet. Gummi-Teile des Fahrwerks werden mit Talkum-Puder behandelt, damit sie geschmeidig bleiben. Um die Kabine zu schützen, werden die Sonnenblenden aller Fenster geschlossen, und die Fenster werden darüber hinaus mit einer Schutzschicht versehen. Auf einer großen Station wird mit viel Vorlaufzeit etwa eine Woche benötigt, um alle Maßnahmen auszuführen, damit das Flugzeug wieder in Dienst gestellt werden kann“ [8].

Wide Body:

Ist ein Verkehrsflugzeug mit einem Rumpfdurchmesser von mehr als 5 Metern und mind. zwei Gängen (Twin-aisle) zwischen den Fluggastsitzreihen.

1 Einleitung

Durch die zunehmende Globalisierung stellen Flugzeuge mittlerweile eines der weltweiten Hauptverkehrsmittel für Langstreckentransporte im Güter- und Personentransportverkehr dar. Das bedeutet, dass nach der ersten industriellen Serienfertigung mittlerweile über sechzig Jahre vergangen sind und jedes Jahr weltweit eine Vielzahl von Flugzeugen außer Dienst gestellt werden, wodurch Platz für die neu entwickelten Flugzeugmuster geschaffen wird. Dabei ist zu bedenken, dass gerade in der Luftfahrt eine vielschichtige Entwicklung, bezogen auf leichtere und belastbare Verbundmaterialien, stattfindet.

Das Streben nach mehr Sicherheit, reduziertes Gewicht, leisere Antriebssysteme, weniger Schadstoffe, geringerer Treibstoffverbrauch und der daraus resultierende monetäre Aspekt der reduzierten Unterhaltskosten spielen bei der Entwicklung eine wichtige Rolle. Der Verbund Flugzeug wird mit seinen enthaltenen Roh- und Wertstoffen in Summe jedes Jahr komplexer und leichter. Die Entwicklung der Verbundstoffe fing bei einer Holz/Stoff-Konstruktion an, entwickelte sich über eine viel zu schwere Stahlkonstruktion (Junkers J1) bis hin zu einer soliden Aluminiumlegierung / Stahl-Konstruktion, die über 80 Jahre die Flugzeugzelle stabil in der Luft gehalten hat.

Seit den fünfziger Jahren wurden kontinuierlich neue Faserverbundwerkstoffe, wie z. B. Glasfaser und Kohlefaser, eingesetzt. Den letzten Meilenstein stellt das Verbundflugzeug Boeing 787 (Dreamliner 2011) mit einem Faserverbundanteil von 50 % und einem höherem Titananteil, der die konventionelle Werkstoff-zusammensetzung eines Flugzeugs augenscheinlich ablöst, dar. Entwicklung der Materialzusammensetzung beispielhaft an unterschiedlichen Boeing Flugmustern, dar, siehe Abbildung 1. Durch die sich stetig ändernde Zusammensetzung der Flugzeuge, die eingebauten Sicherheitsfaktoren und die Volatilität der Rohstoffmärkte rückt die Gewinnung und Aufbereitung von Sekundärrohstoffen immer stärker in den Fokus der Luftfahrtindustrie.

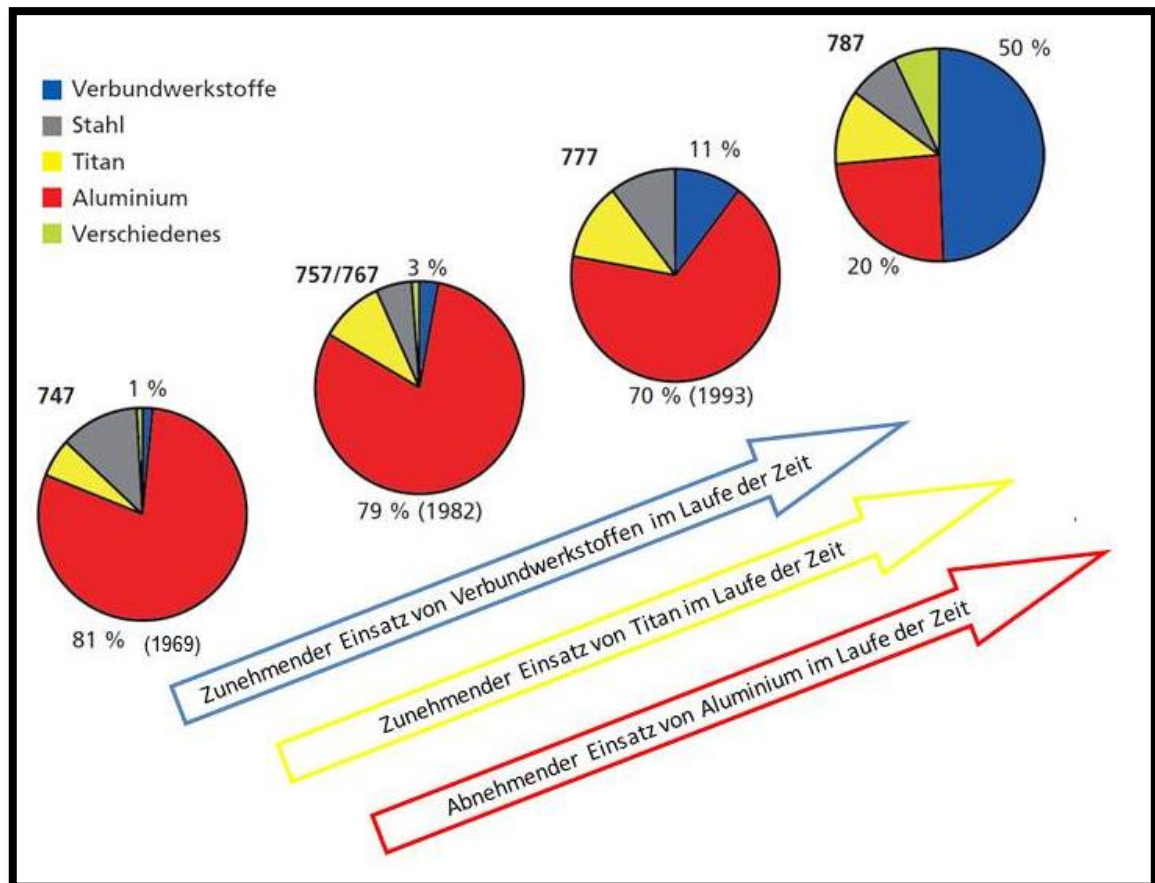


Abbildung 1: Exemplarische kommerzielle Boeing Flugzeuge - Trend der Werkstoffanteile bei unterschiedlichen Flugzeugmustern [9]

1.1 Geschichte der Luftfahrt

Die erfolgreiche Geschichte der Luftfahrt startete im Jahr 1889 mit Otto Lilienthal und seiner Veröffentlichung „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Ein Beitrag zur Systematik der Flugtechnik“ [10]. In diesem veröffentlichten Schriftstück wird erstmalig das Grundprinzip des freien Fluges allgemeinverständlich dargestellt und die Konstruktion von Flugapparaten beschrieben. Dieses theoretische Werk belegte er in der Praxis 1891 mit einer erfolgreichen Flugstrecke von bis zu 25 m, mit dem sogenannten Derwitzer Apparat, den er mit der Zeit kontinuierlich weiterentwickelte. Mit diesen erfolgreichen Versuchen startete er gleichzeitig den Beginn des starrflügeligen Personentransports, der sich in den nächsten Jahren, was die Leistung der kreierte Maschinen und die anfänglich verwendeten Materialien aus Holz und Stoff betrifft, stark verändert, vgl. [11].

Die Entwicklung der leistungsorientierten Motorflugzeuge begann mit den Brüdern Wilbur und Orville Wright, 14 Jahre später, und einem 12 Sekunden motorisierten Jungfernflug am 17. Dezember 1903. Der erste Materialmeilenstein wurde mit dem Ganzmetallflugzeug der Propellermaschine Junkers J 1 dargestellt. Die ersten Verbundkonstruktionen aus Stahl, wie z. B. die Junkers JU 52, konnten durch das Aufkommen des Werkstoffs Aluminium substituiert und optimiert werden.

Die Entwicklung der strahltriebwerkgetriebenen Flugzeuge begann 36 Jahre später, als am 27. August 1939 Erich Warsitz die Heinkel He 178 zu einem sechsminütigen Jungfernflug startete. Im Mai 1952 setzte die British Overseas Airways Corporation (heute British Airways) eine Havilland DH 106 Comet für den Linienflug von London nach Johannesburg ein. Die Comet war das erste in Serie gebaute Düsenverkehrsflugzeug. Die eingesetzte Maschine, mit einer Geschwindigkeit von 800 km/h, halbierte die Streckenzeit nahezu. Im Gegensatz zu den mit Kolbenmotoren angetriebenen Propellermaschinen war das Flugzeug für die hohe Geschwindigkeit vibrationsarm und ruhig. Im Jahr 1958 stellte Pan American World Airways eine vierstrahlige Boeing 707 für die transatlantische Verbindung zwischen New York nach Paris in den Dienst. Das Wettrüsten der Flugzeuge mit Strahltriebwerken hat mit dieser Entwicklung den Reiseboom der 1960er Jahre ausgelöst, Vgl. [9].

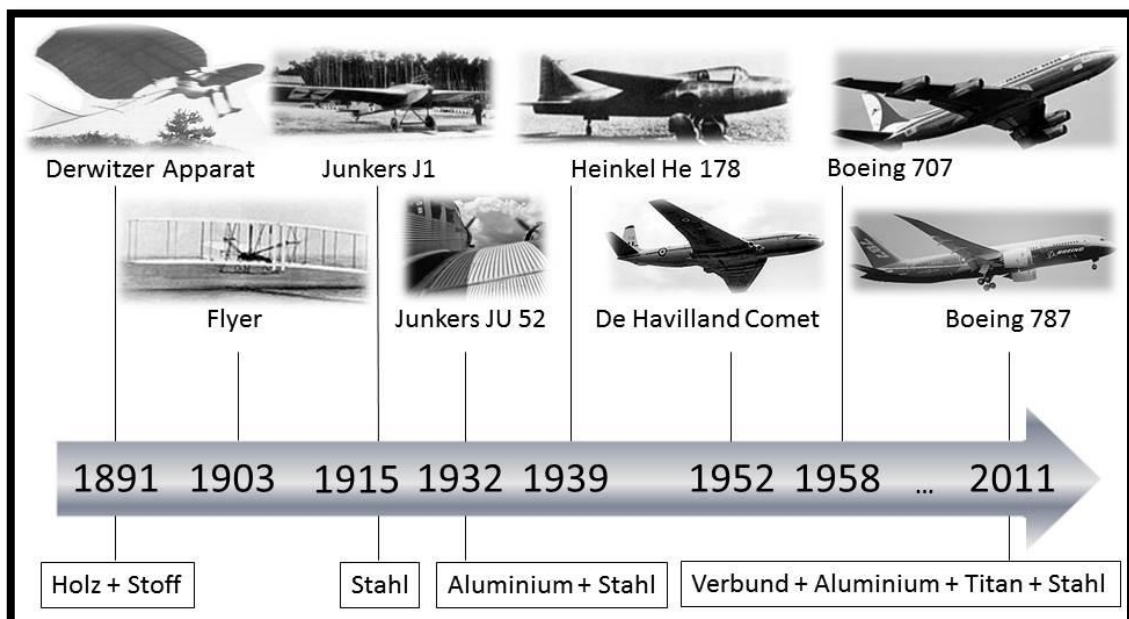


Abbildung 2: Zeitstrahl Entwicklung Flugzeuge (eigene Darstellung)

1.2 Motivation

Um ein Gefühl für den recyclingrelevanten Stoffstrom aus dem Segment der Altflugzeuge zu bekommen, werden zwei veröffentlichte, zu erwartende Recyclingpotenziale des oligopolen Marktes der Luftfahrt angeführt. Zum einen ist dies die Schätzung der amerikanischen Firma Boeing, die aufzeigt, dass im Zeitraum von 2009 - 2028 etwa 8.500 kommerzielle Flugzeuge [12] mit über 100 Sitzen außer Dienst gestellt werden. Zum anderen ist dies der europäische Flugzeughersteller Airbus, der das in Verkehr bringen von ca. 29.226 neuen Passagiermaschinen für den Zeitraum von 2013 bis 2032 prognostiziert. In diesem Zeitraum von 19 Jahren werden ca. 10.334 Altflugzeuge mit mehr als 100 Sitzen außer Dienst gestellt werden, vgl. Abbildung 3.

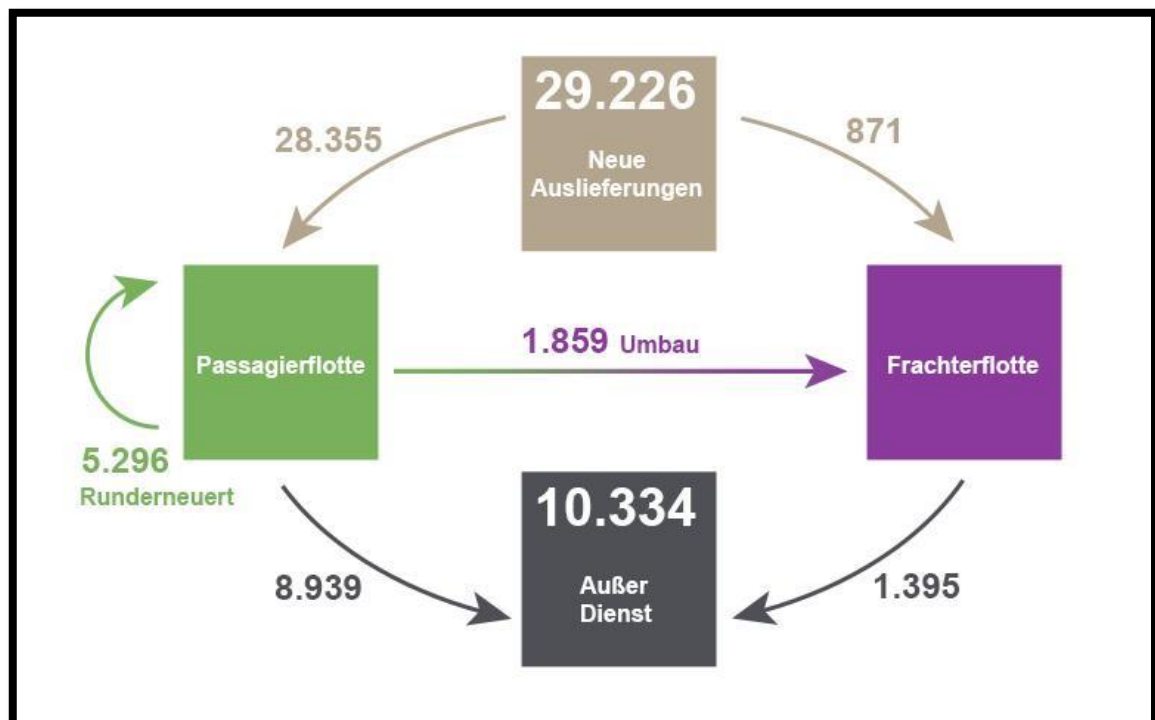


Abbildung 3: Darstellung des Potenzials außer Dienst gestellter Flugzeuge 2013 bis 2032 [13]

Das bedeutet, dass daraus in den nächsten Jahren, unterstützt durch das immense Wachstum der weltweiten Flugzeugflotte, im Mittel etwa 440 – 540 Altflugzeuge pro Jahr stillgelegt werden und der stofflichen Verwertung zur Verfügung stehen. Zusätzlich zu den betrachteten Flugzeugen der Narrow- und Wide Body-Klasse mit mehr als 100 Sitzen ist noch ein erheblicher Anteil von kleineren Regional-Jets, Sport- und Militärmaschinen zu erwarten, vgl. [9].

1.3 Aufgabenstellung und Ziel der Arbeit

In den nächsten Jahren wird auf Basis der vorgenannten Potenziale ein großes Materiallager an Sekundärrohstoffen aus dem Verbund „Altflugzeug“ weltweit zur Verfügung stehen. Die Begrifflichkeit „Altflugzeug“ findet in dieser Arbeit Verwendung, wenn ein Flugzeug nach geltendem Luftfahrtrecht abgemeldet worden ist. Die entsprechende Abfallbezeichnung Altflugzeug bzw. Altfahrzeug, mit dem dazugehörigen entwickelten Recyclingprozess von einem gefährlichen Abfall zu einem ungefährlichen Abfall, wird in dieser Arbeit dargestellt.

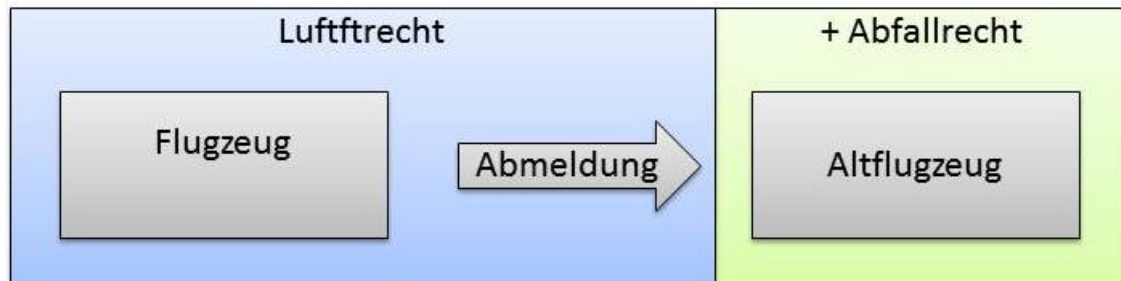


Abbildung 4: Definition Altflugzeug (eigene Darstellung)

Um diese wertvollen Materialien für die Wirtschaft zu sichern und für die Stoffkreisläufe nutzbar zu machen, ist die Entwicklung und Einführung eines strukturierten Verwertungssystems notwendig. Im Rahmen dieser Arbeit wird der derzeitige Stand der Technik aller wesentlichen Faktoren und Rahmenbedingungen im End-of-Life-Management von Altflugzeugen erarbeitet. Es wird eine mögliche Behandlung von einem Altflugzeug (in Anlehnung an ein Altfahrzeug), von einem gefährlichen Abfall zu einem ungefährlichen Abfall, untersucht. Es ist das Ziel einen technischen Prozess abzuleiten, der einen gesetzeskonformen ökologischen und ökonomischen Rückbau von stillgelegten Altflugzeugen sicherstellen kann.

Hierfür wird das Altflugzeug auf die verbauten Materialien und Materialverbunde untersucht, um das verwertbare Materiallager der stofflichen Recyclingpotenziale aufzuzeigen. Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Betrachtung der Aufbereitung der komplexen Materialverbunde mittels unterschiedlicher Verfahren unter Berücksichtigung technischer und betriebswirtschaftlicher Gesichtspunkte. Es wurde im Rahmen dieser Forschungstätigkeit ein dezentraler Ansatz geprüft, bei dem Altflugzeuge durch eine mobile Einheit demontiert, schadstoffentfrachtet, vorzerkleinert und anschließend in adäquate Aufbereitungskanäle verbracht werden können.

1.4 Vorgehensweise

In der vorliegenden Arbeit werden zunächst die abgeschlossenen und aktuell laufenden Forschungsprojekte und daraus abgeleitete Verwertungsansätze vorgestellt und zusammengefasst. Es werden weiterhin die größten Flugzeughersteller und Unternehmen vorgestellt, die im Segment des End-of-Life-Managements von Flugzeugen zurzeit agieren. Des Weiteren werden die abfallrechtlichen europäischen Grundlagen diskutiert und eine mögliche Anlehnung an die Altfahrzeugverordnung beschrieben. Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt auf Flugzeugen mit mehr als 100 Passagiersitzen.

Das Altflugzeug muss nach der Außerdienststellung durch einen definierten Prozess über eine anerkannte Abfalldeklaration von einem gefährlichen Materialverbund zu einem ungefährlichen recyclingfähigen Materialverbund vorbereitet werden. Dazu wurde zunächst ein vorbereitender Prozess für eine umwelt- und gesetzeskonforme Schadstoffentfrachtung entwickelt, um das Materiallager für die stoffliche Verwertung nutzen zu können.

Es wurden technische Voruntersuchungen im Pilotmaßstab mit Unterstützung der Bundesstelle für Fluguntersuchung (BFU), der Exner Technology GmbH und der Keske Entsorgung GmbH durchgeführt, um die grundsätzliche Umsetzbarkeit des Prozesses in einem Projekt abzubilden. Diese Voruntersuchung wurde mit einer havarierten Piper PA 31T am Standort Langelshiem durchgeführt. Die Umsetzbarkeit des Ansatzes wurde von der Keske Entsorgung GmbH als positiv bewertet. Der offizielle Projektstart zum Flugzeugrecycling wurde von der Keske Entsorgung GmbH im März 2011 mit einem orientierenden Rück-

bauprojekt in Zusammenarbeit mit dem Marinefliegergeschwader 3 in Nordholz durchgeführt. Im Juli 2011 wurden zwei weitere kleinere verunfallte Regional Jets von der BFU zur Verfügung gestellt. Die Altflugzeuge wurden schadstoffentfrachtet, gemeinsam mit der Exner Technology GmbH in Langelsheim aufbereitet und die produzierten Sekundärrohstoffe wieder in den Stoffkreislauf eingeführt.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde zudem ein internationales, anwendungsorientiertes Rückbauprojekt mit Altflugzeugen durchgeführt. Dabei wurden im September 2011 zwei Boeing B737-300 in Kuala Lumpur (Malaysia) schadstoffentfrachtet, vorzerkleinert und nach Deutschland verbracht, wo das Material letztendlich aufbereitet wurde. Des Weiteren wurde im Oktober 2012 eine Frachtmaschine Airbus A300-B4 in Leipzig schadstoffentfrachtet und ebenfalls aufbereitet. Ein weiteres Projekt wurde im Juli 2014 in Deutschland durchgeführt, der Rückbau eines Airbus A310-324 und im Dezember 2014 der Rückbau einer Fokker 50 in Luxembourg. In Abbildung 5 sind die praktischen Demontageprojekte, die dieser Arbeit zugrunde liegen, im Zeitraum 2010 – 2014 dargestellt.

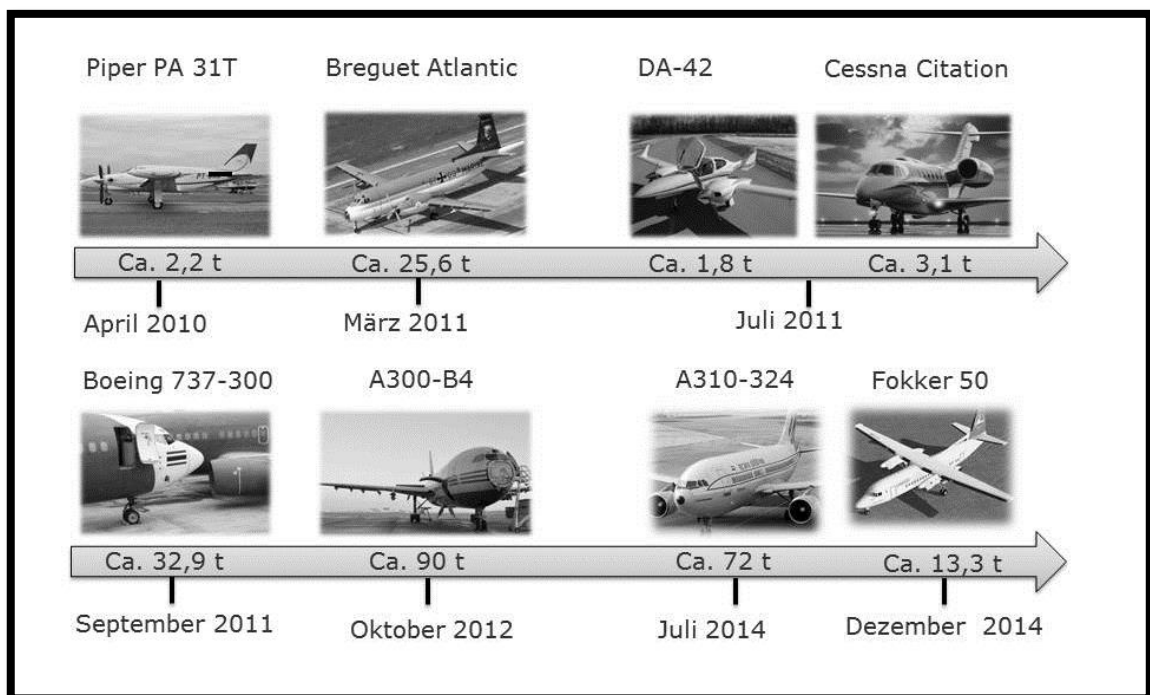


Abbildung 5: Durchgeführte Demontageprojekte von Altflugzeugen mit entsprechenden Gesamtmassen (eigene Darstellung)

Parallel zu den aufgeführten Demontageprojekten wurde das zweijährige Forschungsprojekt MORE-AERO am 01. Mai 2012 gestartet. Das Projekt hatte die Entwicklung einer mobilen Demontageeinheit zum Ziel und sollte den entwickelten Prozess von dezentralen, ökologischen und ökonomischen Demontagepraktiken für den Umgang mit Altflugzeugen abbilden. Ein erster erfolgreicher praktischer Einsatz der Teileinheit zur Schadstoffentfrachtung der entwickelten mobilen Einheit erfolgte im Oktober 2013 in Hamburg. Es wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Schwerpunktuntersuchung mit dem Thema „Entwicklung eines exemplarischen Minimumstandards für die Entsorgung von Altflugzeugen“ vorgenommen. Diese erfolgte beispielhaft an einem Airbus A340 - 300 mit freundlicher Unterstützung der Lufthansa Technik AG, der Keske Entsorgung GmbH und des IFAD der TU Clausthal.

Auf Grundlage der gesammelten praktischen Erfahrungen, der abgeschlossenen Forschungsprojekte (wie z. B. Projekt Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft (PAMELA)) und der zur Verfügung stehenden Literatur wird in dieser Arbeit auf den Aufbau von Flugzeugen, die verwendeten Materialien, die Gefahr- und Schadstoffe, das End-of-Life-Management und die grundlegenden ökonomischen Aufbereitungs- und Absatzmöglichkeiten von Altflugzeugen ausführlich eingegangen.

Diese wissenschaftliche Arbeit basiert auf den praktischen Erfahrungen bei den vielen abgeschlossenen Forschungs- und Demontageprojekten. Sie beschreibt umfassend den Aufbau von Flugzeugen, die dort verwendeten Materialien, sowie den Umgang mit den eingesetzten Gefahr- und Schadstoffen bei den Demontgearbeiten. Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit beschreibt die technischen Aufbereitungsmöglichkeiten der einzelnen Materialien und das End-of-Life-Management für Altflugzeuge. Ein weiterer Schwerpunkt war die Ermittlung und Darstellung des potenziellen Materiallagers, die Darstellung der Wertschöpfungskette sowie die Entwicklung einer Konzeptidee unter ökonomischen Gesichtspunkten.

1.5 Derzeitige Situation

In der internationalen Schifffahrt und der europäischen Automobilbranche haben sich bereits Recyclingkonzepte mit geforderten Schadstoffauflistungen, Recyclingquoten und Demontagepraktiken etablieren können. In der Nische der Luftfahrzeuge gibt es diese Konzepte und belastbare Informationen über den Verbund „Altflugzeug“ zurzeit noch nicht in ausreichender Form. Es ist daher schwierig für Aufbereitungsunternehmen, an verlässliche technische Informationen über Flugzeuge, die potenziellen Gefährdungen für Mensch und Umwelt sowie die verwendeten Materialien zu gelangen. Daher wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit geprüft, wie die Informationsgewinnung erfolgt und ein ökologischer Prozess und die vorbereitenden Maßnahmen zur stofflichen Verwertung von Altflugzeugen unter Gesichtspunkten von Ökonomie, Ökologie und Arbeitssicherheit aussehen könnten.

Erschwerend zu den fehlenden Informationen kommt der lange Produktlebenszyklus von Flugzeugen mit 20 - 30 Jahren [14] hinzu. Die verwendeten Materialien und speziell die Zusammensetzung der Aluminiumlegierungen unterscheiden sich von Flugzeuggeneration zu Flugzeuggeneration durch den langen Lebenszeitraum wesentlich. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der verbauten Leichtbaumaterialien und die hohen Anforderungen der Luftfahrt ist ein „Closed-Loop-Recycling“ in diesem Bereich zurzeit unmöglich. Es gilt im Rahmen dieser Arbeit zu prüfen, welche verschiedenen Materialien in der Luftfahrt verwendet und verbunden worden sind. Daraus werden vorbereitende Maßnahmen und Aufbereitungsmöglichkeiten von Altflugzeugen geprüft, die der Steigerung der Wertschöpfung der aufzubereitenden Materialien aus der stofflichen Verwertung zur Verfügung stehen und dienlich sind.

Bevor ein Flugzeug abgemeldet und außer Dienst gestellt wird, prüft der Halter eines Flugzeugs die mögliche Wiederverwendung der Hochwertteile. Je höher die Nachfrage bzw. je zahlreicher die in Betrieb befindliche Flotte des Flugzeugmusters ist, desto höher ist tendenziell der Wert des Bauteils. Die derzeitige Begrenzung stofflicher Verwertungspotenziale ist durch den hohen monetären Wert der noch angemeldeten Flugzeuge und der potenziell enthaltenen Hochwertteile gegeben, die der stofflichen Verwertung und Entsorgung der Reststoffe von Altflugzeugen gegenüberstehen.

Vor dem Hintergrund dieser Ausgangssituation betrachtet die vorliegende Arbeit einen neuen Aspekt am Ende des Lebenszyklus von Flugzeugen unter dem Gesichtspunkt von Verwertungsansätzen, denen bisher wenig Beachtung geschenkt wurde. Sie bildet damit ein sehr junges Forschungsgebiet ab und der Stand der Technik kann zusammengefasst als Stand der Forschung angesehen werden.

Im folgenden Kapitel werden zum einen die bereits abgeschlossenen und die noch laufenden Forschungsprojekte im Bereich des End-of-Life-Managements von Altflugzeugen vorgestellt. Zum anderen werden beispielhafte industrielle Unternehmen vorgestellt, die im Sektor des End-of-Life-Managements von Flugzeugen derzeit agieren.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die europäische Forschungslandschaft und den Inhalt der dieser Arbeit vorausgegangenen Projekte im Bereich des End-of-Life-Managements von Flugzeugen gegeben werden. Des Weiteren wird eine Vorstellung des derzeitigen Stands der Technik im Bereich Altflugzeug-recycling abgebildet.

Im Folgenden wird auf das erste namhafte europäische Projekt PAMELA eingegangen, welches in den Jahren 2005 - 2007 durchgeführt wurde. Weiterhin wird die Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) vorgestellt, die im Jahr 2006 von industriellen Firmen in Amerika gegründet worden ist. Der Verband entwickelt und veröffentlicht eine „Best Management Practice“ (BMP). Diese enthält Vorschläge zum Umgang mit den Komponenten beim Hochwert-teileausbau, zur Einhaltung von Umweltschutzmindestanforderungen und eine Empfehlung für die Vorgehensweise beim Recycling von Altflugzeugen.

Weiterhin wird das europäische Projekt Clean Sky vorgestellt, das sich im Themenfeld Eco-Design mit recyclinggerechter Produktgestaltung beschäftigt. Die eigenen Untersuchungen, die der vorgelegten Dissertation zugrunde liegen, wurden im Rahmen des Projektes MORE-AERO und über diverse Industrieprojekte der Keske Entsorgung GmbH durchgeführt.

2.1 Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft (PAMELA)

Das abgeschlossene EU-Projekt „**Process for Advanced Management of End of Life of Aircraft**“, im weiteren PAMELA genannt, wurde durch Airbus France, SITA (Groupe SUEZ), France EADS SOGERMA, France EADS CCR, France and Germany Préfecture des Hautes-Pyrénées und das Land Frankreich im Zeitraum 01.03.2005 - 30.10.2007 unter der EU Projektnummer LIFE05 ENV/F/000059 durchgeführt. Das Gesamtvolumen dieses Projektes lag bei 3.242.694,00 €, wovon im Rahmen der Europäischen Kommission über das LIFE Programm 1.159.961,00 € gefördert wurden [15].

Das EU-Projekt wurde exemplarisch an einem Airbus A300-B4-MSN194 durchgeführt. Hintergrund dieses europäischen Verbundprojektes ist die Entwicklung

eines Konzeptes zur Außerdienststellung für Altflugzeuge und der Darstellung verschiedener Rückbauansätze. Ein Baustein dabei ist die Erhebung von verbauten Materialien für die stoffliche Verwertung. Zuerst wurde dazu eine Entscheidungsmatrix entwickelt, die im Wesentlichen in drei Felder unterteilt ist: D1 Storage und Außerbetriebnahme aktiver Flugzeuge, D2 Komponenten Demontage und Refurbishing der hochwertigen Komponenten und D3 Rückbau der außer Betrieb genommenen Altflugzeuge zur Vermarktung, vgl. Abbildung 6. In Phase D1 besteht die Möglichkeit, falls es sich wirtschaftlich abbilden lässt, nach dem Storage Modus das Flugzeug wieder in Betrieb zu nehmen, oder aber die höheren Wartungskosten in Kauf zu nehmen und das Flugzeug im Flugbetrieb agieren zu lassen. Falls die Wiederinbetriebnahme sich nicht abbilden lässt, müssen im Wesentlichen zwei Entscheidungen getroffen werden. Die erste Entscheidung D2 obliegt der Hochwertteilegewinnung und der Abschätzung des gegenwärtigen monetären Wertes der hochpreisigen Komponenten. Das Ziel dabei ist, die einzelnen Komponenten zu veräußern, um den Wert des Altflugzeugs zu steigern.

Wenn diese Entscheidung abgewogen und getroffen ist und die Entnahme der Bauteile mit anschließender Überprüfung für den Verkauf und der dazugehörigen Runderneuerung präferiert wurde, entsteht die nächste Entscheidungsfrage D3. Hierbei muss entschieden werden, ob das Altflugzeug abgemeldet und abgewrackt werden soll, um Sekundärrohstoffe in die passenden Wege der stofflichen und energetischen Verwertung zu führen oder aber die Park-Variante im Storage-Modus genutzt werden soll. Im Fall eines Rückbaus beginnt nach der Abmeldung des Flugzeugs die durchdachte Demontage (Smart Dismantling) und die darauf folgende Verbundstoffaufbereitung in den Aufbereitungsanlagen.

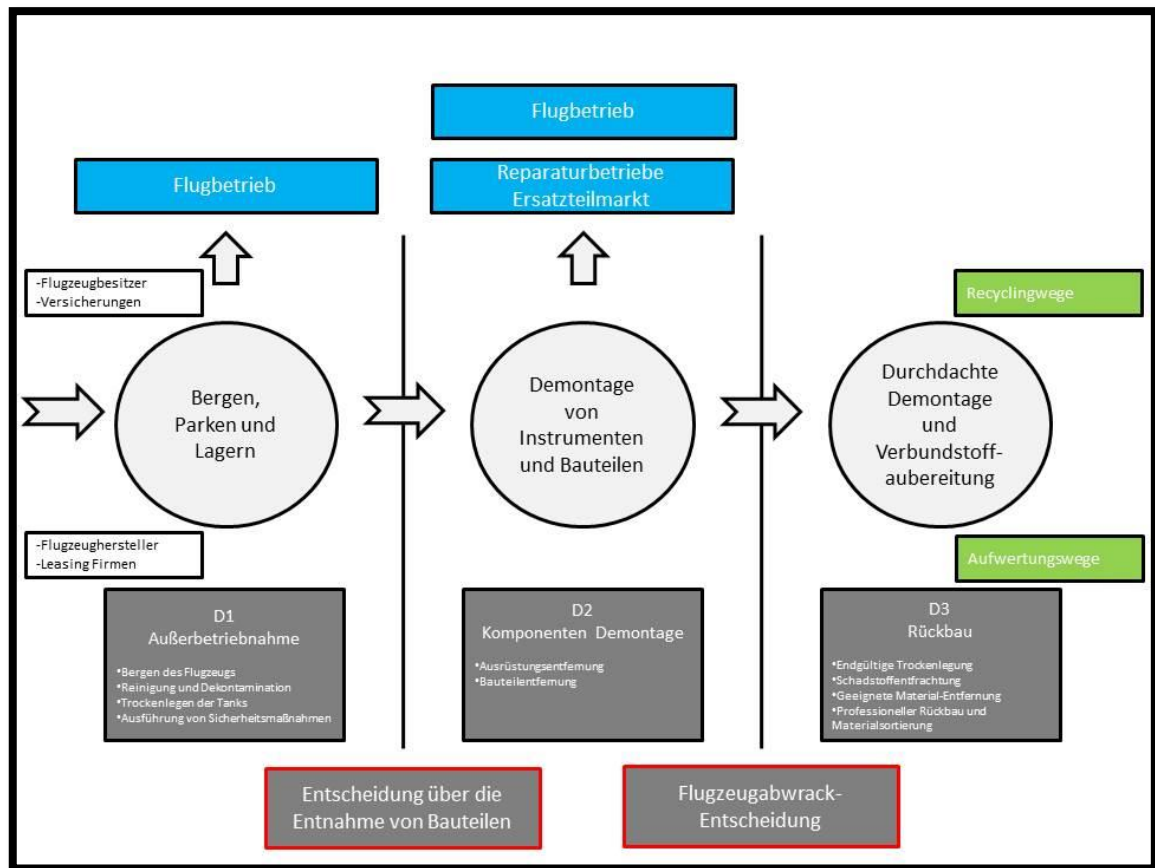


Abbildung 6: Entscheidungsmatrix PAMELA [16]

Anhand eines Airbus A300-B4-MSN194 wurden in diesem Projekt brutto 106 t Leergewicht mit allen Betriebsmitteln angenommen. Wie in Abbildung 7 dargestellt, werden 18 t aus den Betriebsmedien (Kraftstoff, Wasser und Abwasser) nicht berücksichtigt. Auf Basis der verbleibenden 88 t wurden 13,5 t in die Wiederverwendung durch Runderneuerung der Hochwertteile und 61 t in die stoffliche Verwertung gegeben. Weitere 13,5 t Verbundmaterial (Kabinenverkleidung, Frachtverkleidung usw.) sind energetisch zu verwerten oder zu beseitigen [17].

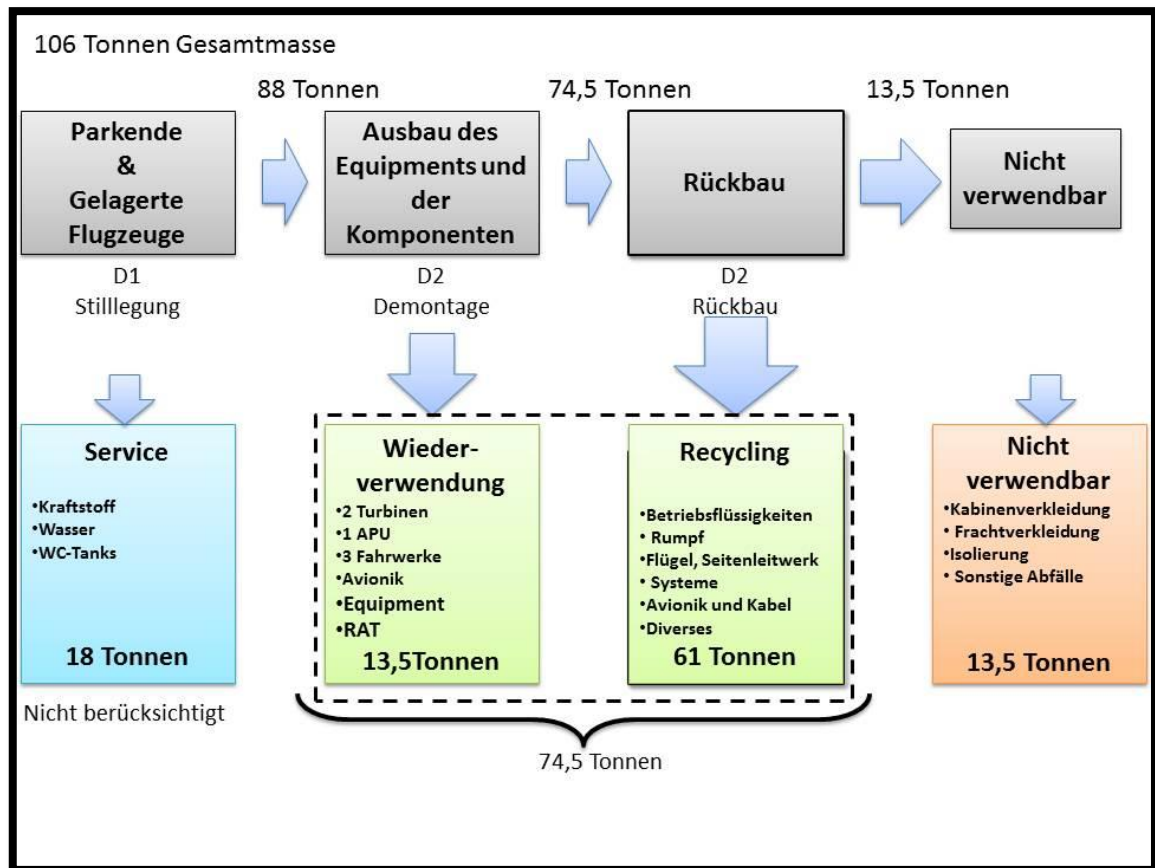


Abbildung 7: Massendarstellung Airbus A300 - B4 PAMELA [17]

Auf Basis der Veröffentlichung aus dem PAMELA Training Kit können anteilig 61 t von 106 t Gesamtgewicht in die stoffliche Verwertung verbracht werden. Das ergibt einen prozentualen Anteil von 57,5 % Verbundstoffmaterial, das in die Aufbereitung gehen kann. Zzgl. der Komponenten für die Wiederverwendung liegt das Projektergebnis bei einem Potenzial für Wiederverwendung, energetische Verwertung und Recycling von 70,3 % vom Gesamtgewicht mit 106 t bzw. 90,3 % auf Basis der betrachteten 88 t Leergewicht mit Ausschluss der verwendeten Betriebsmittel, vgl. Abbildung 7.

Die dargestellten 61 t Recyclingmaterial aus dem eigentlichen Rückbau des Altflugzeugs setzen sich, wie in Abbildung 8 dargestellt, aus Aluminium, Stahl, Titan und sonstigen Verbundstoffen zusammen.

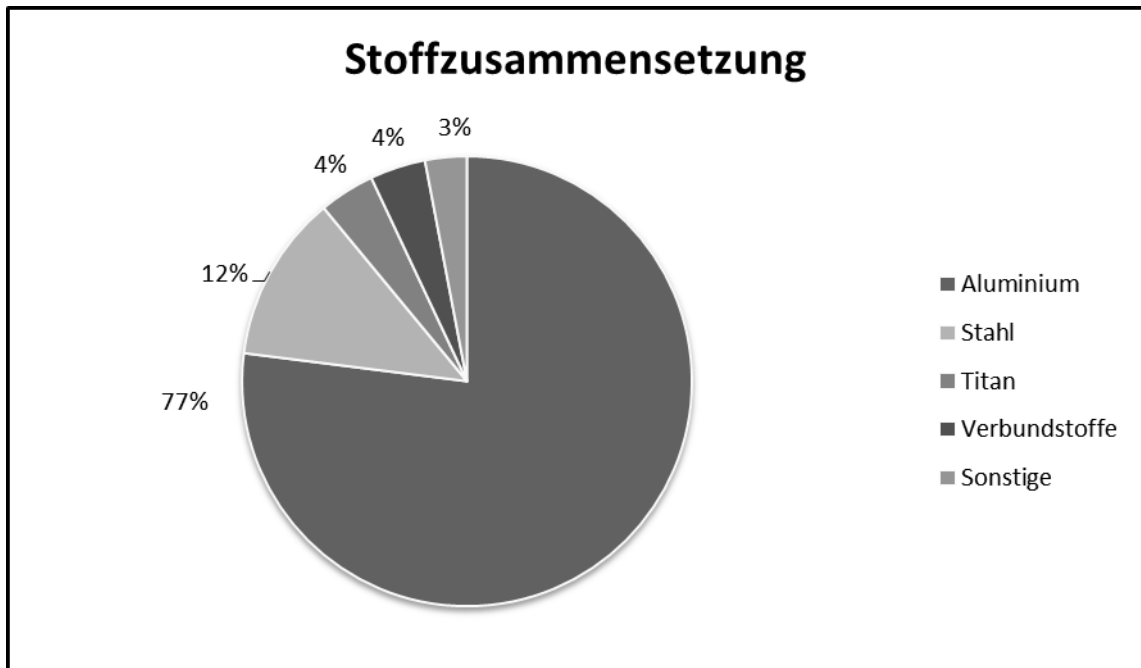


Abbildung 8: Materialzusammensetzung in Masseprozent eines Airbus A300-B4 (eigene Darstellung)

Das von Airbus initiierte Forschungsprojekt war weltweit das erste Projekt, welches sich grundlegend mit dem ganzheitlich strukturierten Rückbau von Altflugzeugen und dem End-of-Life-Management auseinander gesetzt hat. Als Ergebnis des Forschungsprojektes wurde eine Entscheidungsmatrix für die Umwandlung von einem aktiven Flugzeug zu einem Altflugzeug entwickelt. Weiterhin wurde eine Massenbilanz mit einer entsprechenden Materialzusammensetzung erstellt. Es wird aber nicht umfänglich auf die potenziellen Schadstoffe und die sichere Demontage und Entsorgung von gefährlichen Abfällen eingegangen. Weiterhin wurde keine Betrachtung der verschiedenen Aluminiumlegierungen und Aufbereitungsmöglichkeiten in diesem Projekt durchgeführt. Nicht zuletzt wurde ein stationärer und kein mobiler Ansatz für den Rückbau von Altflugzeugen gewählt.

Aus diesem Projekt sind die Firmen Tarmac Aerosave am L'Aérodrome Tarbes-Lourdes-Pyrénées, Frankreich, und die Tarmac Aragón am Aeropuerto de Teruel in Spanien mit einem stationären Geschäftsmodell entstanden. Diese Unternehmen bieten drei Dienstleistungen im Altflugzeugsegment an. Es handelt sich zum einen um die Bereitstellung von großen Parkflächen für das Parken (Storage) von Flugzeugen. Zum anderen wurde ein Part 145 MRO-Betrieb gegründet, der für die Wartung im Storage-Modus und auch für

den qualifizierten Ausbau von hochwertteiligen Komponenten der Flugzeuge genutzt werden kann. Als dritte Dienstleistung wird das stationäre Rückbauen mit geeigneten Rückbauflächen für die stoffliche Verwertung der Altflugzeuge angeboten.

2.2 Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA)

Der US-Branchenverband Aircraft Fleet Recycling Association (AFRA) ist ein gemeinnütziger Verband, der seinen Hauptsitz in Washington D.C. in den Vereinigten Staaten von Amerika hat. Der Verband ist weltweit die erste Vereinigung, die sich mit der alternden Flugzeugflotte im Abschreibungssegment und ihrer industriellen Expertise durch die Industrieunternehmen auseinandersetzt. Der Verband wurde im Juni 2006 durch 11 Gründungsmitglieder (Adherent Technologies, Air Salvage International, Bartin Recycling Group, Boeing, Châteauroux Air Center Europe Aviation, Evergreen Air Center, Huron Valley Fritz West, Milled Carbon Ltd., Rolls Royce, WINGNet/Oxford University) gegründet. Das größte industriell fertigende Unternehmen des Verbandes ist der amerikanische Flugzeughersteller Boeing.



Abbildung 9: AFRA Logo [18]

Mittlerweile sind weltweit 69 Mitgliedsfirmen (Stand Mai 2015) aus verschiedensten Bereichen, wie z. B. Flugzeugherstellung, Hochwertteilehandel, Demontagefirmen, Aufbereitungsunternehmen, Leasing- und Finanzierungsunternehmen, vertreten. Aus dem deutschen Raum sind derzeit drei Mitgliedsfirmen (Keske Entsorgung GmbH, CRONIMET Ferroleg. GmbH und GOAL German Operating Aircraft Leasing GmbH & Co. KG) vertreten. Ziel des

Verbandes ist es, Vorschläge für den Umgang mit hochpreisigen Flugzeugkomponenten und den professionellen umweltkonformen Rückbau zu entwickeln und diese durch die Best Management Practice (BMP) als nachhaltigen Mindeststandard zu veröffentlichen. Der Verband arbeitet mit der Aviation Suppliers Association (ASA) zusammen. Es findet einmal im Jahr ein Verbandstreffen an verschiedensten Standorten in den USA statt, um einen regelmäßigen technologischen Wissensaustausch der Mitgliedsfirmen zu fördern. Dieses Verbandstreffen wird gemeinschaftlich abgehalten (ASAAFRA).

Die AFRA veröffentlicht in regelmäßigen Abständen die Best Management Practices, kurz BMP 3.1, (Stand 11. Juli 2013). Die Veröffentlichung kann kostenlos von der Homepage (www.AFRAssociation.org) abgerufen werden. Die BMP soll im Wesentlichen den Mitgliedsunternehmen eine Hilfestellung für die Zertifizierung durch die AFRA geben. Die erste Version der BMP für gebrauchte Flugzeugkomponenten und Baugruppen wurde im August 2008 von der AFRA herausgegeben. Die erste Aktualisierung zur Version 2.0 erschien im Mai 2009. Die erste Fassung der „BMP for Recycling“ wurde von der AFRA am 17. Januar 2012 veröffentlicht. Die in diesem Kapitel der Arbeit vorgestellte Version ist die BMP 3.0 vom 22. April 2013. In der neuesten vorgestellten Version wurden die beiden einzelnen Versionen für gebrauchte Flugzeugkomponenten und die Recycling BMP zu einer Version vereinigt. Diese wiederum wird in drei Hauptkapitel unterteilt.

Tabelle 1: Auszug aus Inhaltsverzeichnis BMP 3.1 für Demontage- und Recycling-Unternehmen:

Kapitel 1	Allgemeine Vorschriften für beide Unternehmenstypen
Kapitel 2	Vorschriften für Demontage-Unternehmen
Kapitel 3	Vorschriften für Recycling-Unternehmen
Anhang 1	Praxisratgeber bewährter Methoden und Minimum Standards
Anhang 2	Praxisratgeber Verträge und Vertragselement Checkliste für Demontagebetriebe
Anhang 3	Praxisratgeber Verträge und Vertragselement Checkliste für Recyclingbetriebe
Anhang 4	Platzhalter
Anhang 5	Praxisratgeber für Vertragswerke der Demontagefirmen
Anhang 6	Platzhalter

Der Schwerpunkt liegt im Bereich der Luftfahrt zertifizierten Demontageunternehmen bzw. Hochwertteilehändler im professionellen Ausbau und dem sicheren und gesetzeskonformen Umgang mit Hochwertteilen, die runderneuert und zertifiziert wieder in den weltweiten Gebrauchtteilemarkt verbracht werden können. Im Anhang 1 der BMP ist zum Thema Umweltschutz das Kapitel VIII (1 - 3) hervorzuheben. In diesem Artikel wird kurz auf eine adäquate Trockenlegung und umwelt- und gesetzeskonforme Schadstoffentfrachtung eingegangen. Dazu zählt auch das Vorhandensein einer geeigneten Rückbaufläche. Des Weiteren wird in Kapitel VIII (2) eine dokumentierte Unbrauchbarmachung von nicht mehr verwendungsfähigen Komponenten (Bogusparts Prävention) in der Luftfahrt beschrieben. Im Kapitel VIII (6) wird auf eine qualifizierte Aufbereitungsfirma (Recycler) hingewiesen, die in der Lage ist, die Verbundstoffe nach dem Stand der Technik in sortenreine Fraktionen zu trennen.

Der Anhang 2 gibt Hilfestellung für Auditor-Fragen im Bereich des Ausbaus von Hochwertteilen und der Anhang 3 eine Hilfestellung für den Bereich des Recyclings. Im Falle einer Zertifizierung werden die in Abbildung 10 gezeigten Logos an die erfolgreich zertifizierte Firma inklusive eines Zertifikats übergeben. Dieses ist dann 3 Jahre gültig (Abbildung 10). Für jedes Fachgebiet (Disassembly oder Recycling) wird ein Tagesaudit angesetzt, welches einmal jährlich innerhalb der drei Jahre wiederholt wird. Die AFRA hat den Demontageteil und

das Recycling von Altflugzeugen voneinander getrennt. Es gibt aber auch die Möglichkeit, sich für beide Arbeitsfelder zertifizieren zu lassen.



Abbildung 10: Logo AFRA Zertifizierung [18]

Die BMP zeigt einen grundlegenden Mindeststandard auf, der den Unternehmen im Umgang mit kontaminierten Altflugzeugen und der Gewinnung von Sekundärrohstoffen eine große Hilfestellung anbietet. Der Anhang 5 Praxisratgeber für Vertragswerke der Demontagefirmen ist als neue Hilfestellung hinzugekommen um Vertragswerke einvernehmlich zu gestalten.

Die AFRA weist explizit darauf hin, dass die entwickelte BMP einen Mindeststandard darstellt, die Empfehlungen aber nicht der einzige Weg sind. Die Mitglieder der AFRA-Vereinigung sind angehalten an diesen Veröffentlichungen mitzuarbeiten. Des Weiteren gilt der Hinweis, dass sich die Firmen an geltende Rechtsvorschriften in den einzelnen Ländern zu halten haben. In Deutschland wären das als Grundlage, z. B. das Kreislaufwirtschaftsgesetz, die Abfallverzeichnisverordnung und der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen für die Anforderungen an geeignete Rückbauflächen durch das Wasserhaushaltsgesetz.

Für die Recyclingunternehmen wäre ein Zugriff auf technische Daten von Flugzeugen über den Verband wünschenswert. Daraus könnten Gefährdungen für Mensch und Umwelt erkannt und Lösungen erarbeitet werden. Auf dieser Basis könnte auch eine Schadstoffdatenbank für Demontagefirmen entwickelt und veröffentlicht werden.

2.3 Clean Sky

Das europäische Programm Clean Sky wurde am 05. Februar 2008 mit einem Budget von 1.6 Milliarden Euro aus der Taufe gehoben. Das Forschungsprogramm hat eine Laufzeit bis zum 31. Dezember 2017. Die 12 Gründungsmitglieder sind EADS, Airbus, Eurocopter, Fraunhofer Gesellschaft, Alenia Aermacchi, Agusta Westland, Safran, Thales, Saab, Dassault Aviation, Liebherr und Rolls-Royce. Diese aufgeführten Firmen haben 50 % Forschungsaufwendung als Eigenanteil eingebracht, die übrigen 50 % wurden von der Europäischen Union gefördert. 25 % der Projektmittel wurden durch weitere Ausschreibungen (Call for Proposals) an andere Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Universitäten weitergereicht. In Abbildung 11 ist die Verteilung der teilnehmenden Mitgliedsunternehmen in Europa, Stand Dezember 2013, dargestellt [19].



Abbildung 11: Mitglieder Clean Sky [19]

Clean Sky ist in folgende 6 Arbeitsfelder, sogenannte Integrated Technology Demonstrators (ITD), untergliedert:

Tabelle 2: ITD Arbeitsfelder [19]

Arbeitsfeld	Abkürzung
SMART Fixed Wing Aircraft	SFWA
Green Regional Aircraft	GRA
Green Rotorcraft	GRC
Sustainable and Green Engines	SAGE
Systems for Green Operations	SGO
ECO-Design	ECO

In der folgenden Abbildung 12 sind die Arbeitsfelder aufgezeigt, die in der Technologie (Evaluator) Bewertung zusammen fließen und ein ganzheitliches Bild darstellen sollen.



Abbildung 12: Arbeitsfelder Clean Sky [19]

Die Ziele des Clean Sky Projektkonsortiums sind in ACARE (Advisory Council for Aeronautics Research in Europe) veröffentlicht. Folgende Zielstellungen sollen bis 2020 erreicht werden:

- 50 % CO₂-Reduktion durch drastische Verringerung des Kerosinverbrauchs
- 80 % Nox-Reduktion
- 50 % Reduktion Außenlärm
- Grüner Produktlebenszyklus im Bereich: Design, Herstellung, Wartung und Entsorgung / Recycling

Als Anschlussprojekt ist angestrebt Clean Sky 2 über das europäische Forschungsprogramm Horizon 2020 zu aktivieren. Das EU-Budget für das 8. Forschungsrahmenprogramm von 2014 - 2021 liegt bei ca. 87 Mrd. €. CleanSky 2 plant mit 2,5 Mrd. € [20].

Das Aircraft Metal Recycling Project (AIMERE Projekt) ist aus dem 11ten Clean Sky Proposal JTI-CS-2012-1-ECO-01-050 - "Metal recycling: Recycling routes screening and Design for Environment", vom 13. Januar 2012 entstanden. Das AIMERE-Projekt ist ein Gemeinschaftsprojekt der Firma ENVISA und der Bartin Aero Recycling Group, einer Tochterfirma der französischen Entsorgungsfirma VEOLIA PROPLETE, und mit einer Laufzeit von 20 Monaten angesetzt.

Das Forschungsprojekt erarbeitet einen Ist-Stand der verbauten Materialien und aktuelle Recyclingmöglichkeiten im Bereich der verbauten Metalle in diversen Flugzeugen. Als Forschungsergebnis soll nach der Projektlaufzeit eine Empfehlung für einen ökologischen und ökonomischen Umgang für die Verbundstoffe herausgegeben werden. Des Weiteren sollen die Ergebnisse in eine Ökobilanz eingebunden werden.

Im Zuge dieses Projektes wurde am 02. - 03. Juli 2013 ein Aircraft Metal Recycling Workshop durchgeführt. Ein Schwerpunkt war der Rückbau eines schadstoffentfrachteten Airbus A320. Der Demonstrator wurde am Chateauroux Airport vorzerkleinert und anschließend in eine Aufbereitungsanlage von Bartin in Bourges, Frankreich verbracht und aufbereitet. Die Aufbereitungstechnik bestand aus einem Großshredder, Windsichtung, Magnetabscheider und einer NE-Abscheidung. Die Aufbereitungsanlage ist eigentlich für konventionelle Mischschrotte aus dem Kraftfahrzeugbereich ausgelegt und hat keinen Schwerpunkt auf eine Aluminiumlegierungssortierung [21].

2.4 Modularisierung des Flugzeug-Recyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit im Aerospace-Sektor (MORE-AERO)

Das Forschungsprojekt MORE-AERO – Kurzform für „Modularisierung des Flugzeug-Recyclings durch Entwicklung und Erprobung einer mobilen Recyclingeinheit im Aerospace-Sektor“ - wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert. Der Projektzeitraum dieses Verbundprojektes war ursprünglich vom 01. Mai 2012 bis zum 30. April 2014 angesetzt und wurde um 6 Monate verlängert. Das KMU-Innovativ Verbundprogramm Ressourcen Effizienz, mit der Fördernummer 033R075B, fördert dieses Verbundvorhaben der Süderelbe AG, des IFAD der TU Clausthal, der STUTE Logistics (AG & Co.) KG sowie der Keske Entsorgung GmbH. Die Fördersumme dieses Projektes belief sich auf 356.324,00 € [22]. Ziel dieses Projektes war die Entwicklung von modularen und dezentralen Verfahren zum Recycling von Altflugzeugen, unabhängig vom Standort. Dabei galt es, überall auf der Welt an Altflugzeugen eine Schadstoffentfrachtung durchführen zu können und diese vor Ort zu zerkleinern, so dass eine für die logistische Sekundärrohstoffverbringung optimale Schüttdichte erreicht wird, sowie eine Vortrennung von Teilströmen zu erzielen. Die Untersuchungen und Entwicklungen in diesem Projekt bilden die experimentelle Basis der vorliegenden Dissertation.

Das Forschungsprojekt unterteilt sich in vier Arbeitspakete. Das erste Arbeitspaket - Entwicklung, Bau und Demonstration einer mobilen Zerlege-Einheit betreute die Keske Entsorgung GmbH aus Braunschweig. Das zweite Arbeitspaket - Entwicklung, Planung, Implementierung eines logistischen Konzepts für den weltweiten Einsatz der Zerlege-Einheit - betreute die STUTE Logistics AG & Co. aus Bremen. Das dritte Arbeitspaket – Wertstoffpotenziale aus der Rückgewinnung von Verbundstoffen – betreute das IFAD der TU Clausthal aus Clausthal-Zellerfeld. Das vierte Arbeitspaket – Aufbau eines Unternehmernetzwerks zur Entwicklung einer vollständigen Wertschöpfungskette für das Flugzeugrecycling wurde von der Süderelbe AG aus Hamburg bearbeitet. Des Weiteren wurde das Projektmanagement als Verbundkoordinator von der Süderelbe AG durchgeführt. Vgl. hierzu auch Abbildung 13.



Abbildung 13: Arbeitspakete MORE-AERO [23]

2.5 Weltweit agierende Unternehmen im End-of-Life-Management von Flugzeugen

Die amerikanischen, industriellen Einflüsse durch Gründung der Pacific Aero Product GmbH aus dem Jahr 1916, die bereits 1917 in die Boeing Aeroplane Company umbenannt wurde, sind im oligopolen Weltmarkt der Flugzeughersteller klar erkennbar. Der größte europäische Wettbewerber ist die Airbus Group mit der Tochterfirma Airbus S. A. S., die 1970 gegründet wurde und ihren Hauptsitz in Toulouse, Frankreich hat. Im Bereich der produzierten Großraumflugzeuge (Wide bodies, zwei- /vierstrahlig) behaupten Airbus und Boeing global eine Vormachtstellung unter den Flugzeugherstellern. Weltweit bieten eine größere Anzahl an Herstellern weitere Kurzstrecken- und Langstreckenflugzeuge im kleineren Narrow Body und Business Jet Segment an.

Weitere wichtige weltweite Flugzeughersteller sind:

- Antonow
- Bombardier Aerospace
- British Aerospace
- COMAC (Commercial Aircraft Corporation China)
- De Havilland Aircraft Company
- Embraer
- Lockheed
- McDonnell Douglas (mit Boeing 1967 fusioniert)

- SUKHOI
- Tupolew PSC

In der folgenden Tabelle 3 sind beispielhaft weltweit agierende Unternehmen im Flugzeug- bzw. Ersatzteilsegment, im End-of-Life-Management von Flugzeugen bis hin zum Recycling mit ihren Dienstleistungen aufgezeigt. Ein Großteil der aufgelisteten Firmen ist Mitglied der Branchenvereinigung AFRA, vgl. Kapitel 2.2. Die Auflistung der Unternehmen und der angebotenen Dienstleistungen ist ein guter Indikator dafür, dass für ein funktionierendes Geschäftsmodell die komplette Dienstleistung des End-of-Life-Managements von Flugzeugen angeboten werden muss. Die Tabelle wurde im Rahmen des First European Aircraft Symposiums veröffentlicht und hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3: Auflistung von weltweit agierenden Unternehmen im End-of-Life-Management von Flugzeugen [24]

Company	Disassembly	Dismantling	Recycling	MRO	Re-Certification & Aircraft Components	Conversion & Modification	Parking and Storage	Parts Leasing	Aircraft Rental, Leasing & Financing	Passenger Air Transport	Defence Sector	General Business Information
AAS Metal Recycling Inc.			•									One of the largest scrap metal processors in the United States handling all aspects of ferrous, non-ferrous, high temperature alloy and precious metal recycling.
Adherent Technologies			•								•	A recycler using two different technologies to recycle "Vacuum Cracking Process" & "Wet Chemical Breakdown".
ADI - Aircraft Demolition & Recycling	•	•	•		•						•	Provide complete part-out and disassembly services as well as demolition and recycling for aging aircraft and engines 24/7 On-site service
AELS - Aircraft End-of-Life Solutions	•	•	•		•							Disassembly, Dismantling, Component Management, Recycling
Aero Liquidation												Boys surplus of avionic parts
AerSafe				•	•				•			Specialized in the sale and lease of end-of-life commercial aircraft Material solutions and asset management services
Air Salvage International	•			•	•		•					Company specializes on Aircraft maintenance and parts recovery including recertification.
Apple Aviation	•	•	•	•	•		•					They key business is Aircraft maintenance. Provides a complete "End of Life" Recycling service for these aircraft from removing components that have useful life directly supplying the components to airlines and repair station facilities then to dismantling and recycling of scrap parts. In December of 2012 AEC Aerospace Industries became the largest aircraft recycling company in the world, recycling over 100 Commercial Aircraft yearly
ARC Aerospace Industries												Ascent's FAA and EASA approved repair station specializes in narrow body commercial aircraft and performs aircraft heavy maintenance, line maintenance, modification services, transition services, and engine parts assembly and consignment parts sales.
Ascent Aviation Services	•	•	•	•	•	•	•					Mainly aftermarket servicesreplacement units
Av-Air				•	•							Bertin Recycling is specialized in industrial waste collection and trade of ferrous and non-ferrous metals. (Homepage Offline)
Bairin Group	•	•	•									Bombardier has a dismantling facility in West Virginia and Tucson. Furthermore, Bombardier has a disassembly and recycling facility in the engineering school in Montreal. The goal of the research project is to figure out the most effective way to recycle an aircraft.
Bombardier												Only disassembly of turbines
BonusTech				•								Offering Customized On-Site and Customized Mobile On-Site services.
CANU Aerospace	•	•	•	•							•	Conesus specializes in recycling and recovering value from Commercial and military jet engines.
Cometbus Aerospace									•			Non-scheduled passenger air transport, Aircraft Charter Rental and Aircraft Services. (Homepage Offline)
Dale Aviation										•		specialized in end-of-life aircraft projects.
ECube Solutions	•	•	•				•					ELG is trading and processing of raw materials for the stainless steel industry
ELG			•									ELG Carbon Fibre is converting composite waste into high quality re-usable carbon fibre.
ELG Carbon Fibre Ltd			•									ELG Utica Alloys is a recycling company specializing in superalloys and titanium.
ELG Utica Alloys Inc.			•				•					provide end of life program for aircraft retirement needs
Evergreen Trade	•	•	•		•							focuses on providing high quality component services for the aviation industry. They offer spare parts and components for aircraft and aircraft engine parts and components for aircraft engine organizations or OEMs.
ExSyn Aircraft Components BV	•				•							The company is only formally established
Flight Aircraft Recycling												(Engine) leasing, financial services, parts solutions
GECA AS Aircraft Management Services				•	•				•			Aircraft disassembly and transport, approved aircraft decommissioning & recycling. Certified to recycle military aircrafts from BAE systems
G.D. Services	•	•	•				•				•	specialized in demilitarization military equipment and recycling of military aircrafts
HVF West LLC								•				Aircraft end of life management, engine overhaul management, spare parts recertification, spare parts sales, aircraft dismantling and recycling.
JRW Aviation	•	•	•	•	•							recycling, joint venture with a certified aviation enterprise for the re-certification of aircraft components
Keske				•	•				•			Aircraft & engine management, inventory, aircraft & engine leasing and trading
Magnolia Aviation Services												Management and treatment of waste, demolition, scrapping of aluminium and other metals, located in Spain
MAGMA GESTION MEDIOAMBIENTAL, S.L.U.	•	•	•		•							Specialized in MRO
Marana Aerospace Solutions				•		•	•					Company in expertise of conversion and modification of military airplanes. The company has a lot of experience in the military sector but also in the commercial sector.
Marshall Aerospace and Defense Group			•									scrap metal processor and recycler, ferrous and non-
Maryland Metals Inc.			•									One of the largest metal recycling companies in Europe and the USA. The Group is now actively seeking new opportunities in SE-Asia following a number of successful precious metals reclaim projects.
Masdermitt												turbine disassembly & repairing
MD Turbines				•								one of the United States' leading importers and exporters of Titanium scrap, Nickel Scrap, Cobalt Scrap, Beryllium Scrap, Zirconium Scrap, and other high temperature scrap metal and high temperature alloy scrap.
Monico Alloys Ltd.			•									primarily focuses on secondary aluminum smelting and non-ferrous metal scrap trading
Nantong Metallwell Co., Ltd.			•	•								Supplier of components for aircraft gas turbine jet engines
Orange Aero		•	•				•					company based in Luxembourg, specializes in aircraft sales, aircraft recycling, spare parts and airline consultancy
POWERJET AVIATION	•		•									purchaser, lessor and seller of aircraft, aircraft parts, engines and engine parts and other related support items
Regional One												No information found in the internet (Homepage offline)
Research and Business Development RBD S.A.												one of the major independent scrap metal companies
Robert Gibbs Company			•									supplier of rotatable commercial aircraft parts, disassembly and sale of parts.
Rotable Solutions	•			•	•							Manufacturer of aircraft and rocket engines and propulsion systems e.g. Helicopter engines, and aircraft equipment
SAFRAN Aerospace Defence Security											•	recyclers of scrap metal 50 metals recycling facilities (USA)
Schulizer Steel			•									Aircraft storage, disassembly and mockups & props for the motion picture and television industry
Scroggins Aviation	•		•									Metals recycling focused on aerospace grade aluminum
SOS Metals			•			•						Specialized in aircraft repairing
Source One Aircraft Repair				•								aircraft maintenance, inspection services, aircraft storage, engine lease pool, engine maintenance
Southern California Aviation	•	•	•	•	•	•	•	•				repairing, aircraft parts
SPT Technics	•			•	•							aircraft parts, dismantling
Stewart Industries	•	•	•		•		•					Aircraft decommissioning, aircraft storage / care and maintenance, component recertification, competitive pricing rates
Sycamore	•			•	•							Biggest aircraft storage company in Europe, exclusively dedicated to storage, maintenance and recycling of aircrafts.
Tarmac Aerospace		•	•	•	•		•					Technical services, engine services, recycling
Total Aviation			•	•								engine removal, parts recovery, parking, storage and recycling. Specializes in aircraft end-of-life dismantling, with a particular focus on recycling of metals and alloys.
United Recovery and Recycling	•	•	•				•					disassemble service, approval service and components sales
Universal Asset Management	•	•	•		•		•					prompt and safe destruction and removal of large aircraft
Universal Recycling Company			•									aircraft maintenance, expert in aircraft disassembly and spare parts trading.
Valiere aviation	•	•	•	•	•		•					provider of parts and services; disassembling of aircraft and engines for resale
VAS Aero Services	•			•	•							

2.6 Zusammenfassung und Ausblick zur Forschungslandschaft

Das erste öffentliche namhafte Forschungsprojekt, das sich mit dem Bereich End-of-Life-Management von Verkehrsflugzeugen auseinandersetzt, war das von Fa. Airbus initiierte Forschungsprojekt PAMELA in Frankreich. Die Veröffentlichungen zu diesem Thema beschäftigen sich schwerpunktmäßig mit einer Strategie, wie mit Altflugzeugen umgegangen werden soll und welche Entscheidungen in einem Flugzeugleben getroffen werden müssen, vgl. Abbildung 6. Des Weiteren wurde eine erste Analyse von einer Massenbilanz anhand eines Airbus A300 veröffentlicht. Diese Werte wurden mit den Ergebnissen des MORE-AERO Projektes verglichen und ergaben eine Übereinstimmung.

Die AFRA wurde in Kooperation mit dem amerikanischen Flugzeughersteller Boeing gegründet. Das Ziel dieser Vereinigung ist die Entwicklung und Betreuung eines Mindeststandards BMP 3.1 für den weltweiten Umgang mit stillgelegten Altflugzeugen. Es fehlt in dieser BMP aber ein qualitativer Maßstab, so wird z. B keine Recyclingquote gefordert. Es wird nur auf den Stand der Technik und die geltende Gesetzgebung in den jeweiligen Ländern hingewiesen. Diese können jedoch von ihren Anforderungen weltweit stark voneinander abweichen.

Das Clean Sky Programm beschäftigt sich mit dem ganzheitlichen Lebenszyklus eines Flugzeugs. Im Bereich Eco-Design beschäftigt sich das AIMERE Projekt mit dem Ansatz, das Flugzeug auf die verbauten Materialien zu detektieren und passende Recyclingrouten ausfindig zu machen.

Das Projekt MORE-AERO beschäftigt sich mit einem mobilen Ansatz, aus Altflugzeugen Schadstoffe zu entfrachten und eine vorbereitende Vorzerkleinerung und Vorseparation auf dem Flugfeld durchzuführen. Weiterhin werden Schwerpunkte auf die logistischen und zollrechtlichen Herausforderungen für die Sekundärrohstoffe gelegt.

Die vorgestellten Forschungsprojekte setzen sich im Grundsatz alle mit der älter werdenden Flugzeugflotte auseinander. Die Entscheidungsmatrix aus dem PAMELA Projekt gibt eine Indikation über den möglichen Umgang aus Sicht

des Projektmanagements mit Altflugzeugen. Die Hinweise auf den sicheren Ausbau der Komponenten, den gesetzeskonformen Umgang mit Schadstoffen und die kompetente Entsorgung durch Fachbetriebe wird allerdings nur rudimentär gehalten.

Trotz der öffentlich geförderten Forschungsprojekte und industriell gegründeten Verbände für Entsorgungsunternehmen ist es weiterhin schwierig, an belastbare technische Informationen für eine sichere und umweltkonforme Schadstoffentfrachtung zu gelangen. Es wäre hilfreich, wenn die herstellende Industrie Handlungsanweisungen und Datenbanken herausgeben würde, die entsprechende Informationen zum Umgang mit stillgelegten Altflugzeugen enthalten, wie z. B.:

- Allgemeine Informationen von Flugzeugmustern (Dimensionen und Gewicht)
- Sicherheitsempfehlungen
- Ausbau-Empfehlung von potenziell gefährlichen Komponenten
- Lokation der Schadstoffe und druckbelasteter Systeme
- Umgang mit Schadstoffen nach Ausbau
- Materialzusammensetzung der Altflugzeuge

Im folgenden Kapitel werden abfallrechtliche Grundlagen und Vorschriften für den Umgang mit Altflugzeugen dargelegt. Auf dieser Basis wurde dann eine umweltgerechte Schadstoffentfrachtung der gefährlichen Abfälle von Altflugzeugen konzipiert.

3 Abfallrechtliche Grundlagen und Vorschriften im Altflugzeugrecycling

In diesem Kapitel werden die abfallrechtlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und umgesetzter nationaler Ebene für Deutschland beleuchtet, die im Bereich des Altflugzeugrecycling eine richtungsweisende Bindung haben. Für den Verbund Altflugzeug gibt es zurzeit keine spezielle produktbezogene gesetzliche Vorschrift, wie im Bereich der Altfahrzeuge mit der dazugehörigen EG-Altfahrzeugrichtlinie 200053/EG [25] oder im Bereich der Schiffe mit der EU-Verordnung Nr. 1257/2013 [26] zum Schiffsrecycling.

3.1 Verordnungen und Richtlinien auf europäischer Ebene

Auf der europäischen gesetzlichen Ebene wird die Abfallrahmenrichtlinie (WFD - Waste Framework Directive) angeführt, um eine abfallrechtliche Grundlage im Bereich des Altflugzeugrecyclings darzulegen. Ferner wird der Europäische Abfallkatalog (EWC – European Waste Catalogue) dargelegt, um eine Klassifizierung der entstehenden Abfallfraktionen aus dem Verbund Altflugzeug zu ermöglichen.

3.1.1 Europäische Abfallrahmenrichtlinie Waste Framework Directive

Die Waste Framework Directive (WFD) 2008/98/EC [27] ist die maßgebliche abfallrechtliche Grundlage in Europa. Die WFD legt den Rechtsrahmen für den Umgang mit Abfällen in der europäischen Gemeinschaft fest. Es werden Begriffe wie Abfall, Verwertung, Beseitigung und grundlegende Anforderung an die Bewirtschaftung von Abfällen dargelegt. Zudem werden Verpflichtungen und Grundsätze an Anlagen oder Unternehmen gestellt.

Es ist mit Abfällen so umzugehen, dass die Umwelt und die menschliche Gesundheit nicht beeinträchtigt werden. Weiterhin ist die Einhaltung der Abfallhierarchie in Einklang mit dem Verursacherprinzip umzusetzen. Die Abfallhierarchie ist in Prioritäten, vgl. Abbildung 14, dargestellt. Die Mitgliedsstaaten der Europäischen Union legen diese Hierarchie ihren nationalen Rechtsvorschriften im Bereich der Abfallvermeidung und -bewirtschaftung zugrunde [28].

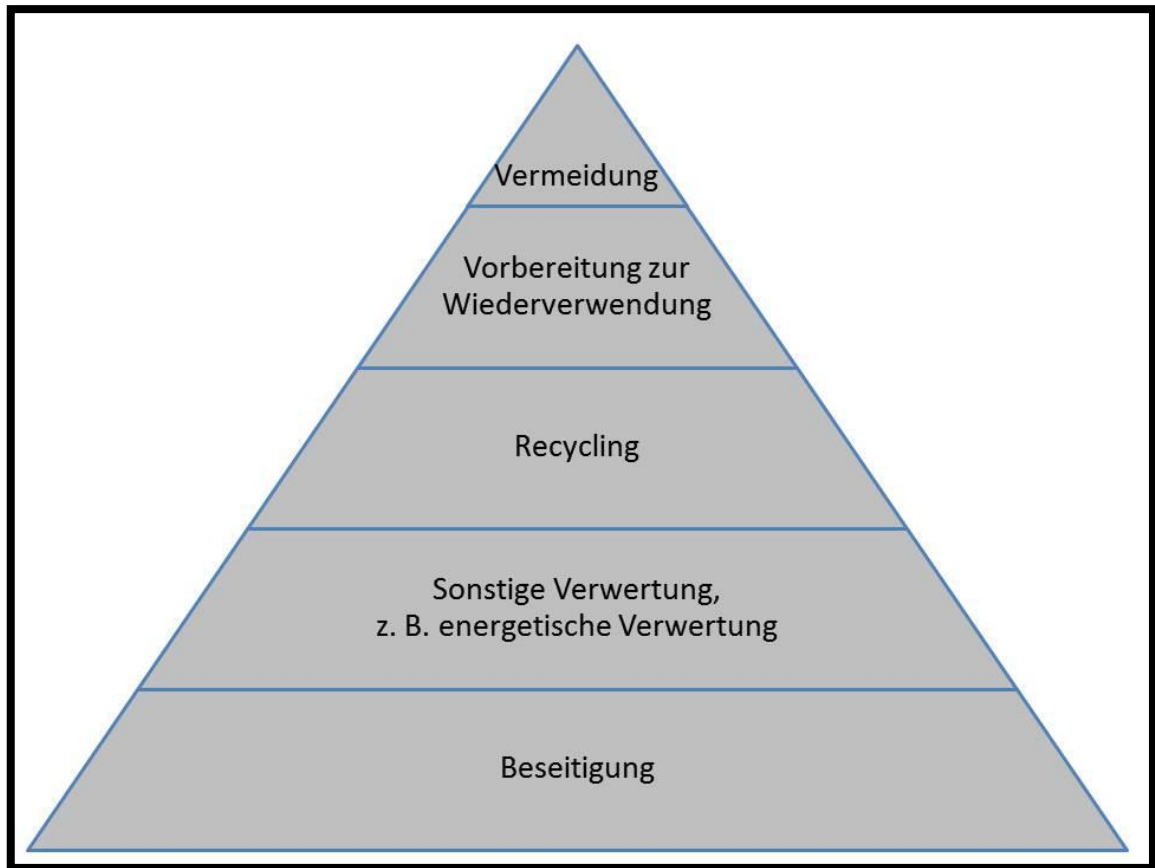


Abbildung 14: Abfallhierarchie auf Basis der WFD [27]

3.1.2 Europäisches Abfallverzeichnis, gefährliche Abfälle

Grundlage einer europaweiten einheitlichen Beschreibung und Klassifizierung von Abfällen ist der Europäische Abfallkatalog (EWC - European Waste Catalogue). Dieser wurde durch die Abfallverzeichnisverordnung (Abfallverzeichnisverordnung, AVV) in deutsches Recht umgesetzt. Die Abfälle werden nach einem sechsstelligen Code herkunftsbezogen klassifiziert, wobei die Abfallherkunft von den Kapitelüberschriften hin zu den einzelnen Codes immer präziser beschrieben wird.

Die mit einem Sternchen (*) versehenen Abfallarten im Abfallverzeichnis sind als gefährlich im Sinne des § 48 [28] (siehe § 3 Absatz 1 der Abfallverzeichnisverordnung) des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) eingestuft. Im Beispiel in Tabelle 4 umfasst die Abfallschlüsselnummer 160104* Altfahrzeuge neben der zahlenmäßig relevantesten Fraktion, den straßengebundenen Fahrzeugen, auch Flugzeuge und Schiffe.

Tabelle 4: Beispiel EWC Abfallschlüsselnummer anhand eines Altfahrzeugs

Obergruppe	16	Abfälle, die nicht anderswo im Verzeichnis aufgeführt sind
Gruppe	16 01	Altfahrzeuge verschiedener Verkehrsträger (einschließlich mobiler Maschinen) und Abfälle
Abfallart	16 01 04*	aus der Demontage von Altfahrzeugen sowie der Fahrzeugwartung (außer 13, 14, 16 06 und 16 08)
Abfallart	16 01 06	Altfahrzeuge

Durch eine geeignete Vorbehandlung des Verbundes Altflugzeug mit der Abfallschlüsselnummer 160104* (Schadstoffentfrachtung der enthaltenen gefährlichen Abfälle in Altflugzeugen) verliert der Abfall seine gefährlichen Eigenschaften und kann anschließend mit der Abfallschlüsselnummer 160106 weiter aufbereitungstechnisch behandelt werden, vgl. Prozess Abbildung 42 (Seite 98).

3.2 Gesetze auf nationaler Ebene

Im folgenden Abschnitt wird die Umsetzung der europäischen Richtlinien auf nationaler Ebene beschrieben. Die WFD wird in Deutschland umgesetzt durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG). Es wird weiterhin auf die abfallrechtliche Nachweisführung in Deutschland eingegangen, da in einem Flugzeug gefährliche Abfälle enthalten sind. Ein Flugzeug kann im weitesten Sinne als Fahrzeug angesehen werden, daher wird ein Bezug zur Altfahrzeugverordnung geschaffen. Die nachfolgenden Kapitel beziehen sich auf nationales deutsches Recht. Außer Dienst gestellte und abgemeldete Altflugzeuge unterliegen somit der Einstufung gefährlicher Abfälle und den dazugehörigen Entsorgungs-

nachweisen. Für den Fall, dass Flugzeuge in anderen Ländern schadstoffentfrachtet und zurückgebaut werden, ist die jeweilige nationale Rechtslage in den Ländern zu prüfen und bei der Umsetzung zu beachten. Sollte der lokale Standard niedriger als in Deutschland sein, sollte dennoch die deutsche Rechtsgrundlage für den Umgang mit gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen zugrunde gelegt werden.

3.2.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Gesetzespassagen aus dem KrWG hervorgehoben, die im Rahmen dieser Arbeit und beim Entsorgungsprozess eines Materialverbunds Altflugzeug Berücksichtigung finden. Dieses umfasst auch die Grundlagen der zu erstellenden Entsorgungsnachweise der gefährlichen Abfälle. Es werden wesentliche Auszüge aus diesem Gesetz dargestellt. Im KrWG ist eine Rangfolge für adäquate Abfallbewirtschaftungsmaßnahmen auf Basis des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips dargelegt, vgl. Abbildung 14. Durch eine Auswahl der Maßnahmen kann das Ziel des KrWG für die beste Gewährleistung des Schutzes von Mensch und Umwelt mit dem Hintergrund technischer, wirtschaftlicher und sozialer Aspekte abgeschätzt und umgesetzt werden [28].

Der Geltungsbereich der Vorschriften des KrWG gilt für

- die Vermeidung von Abfällen sowie
- die Verwertung von Abfällen,
- die Beseitigung von Abfällen und
- die sonstigen Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung [28].

Das Gesetz gilt nicht für Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe im Sinne des Atomgesetzes [29]. Dies betrifft z. B. die radioaktiven Rauchmelder in Altflugzeugen.

Der Zweck des KrWG:

Der Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen [28].

Die Grundpflichten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sagen aus, dass wenn sich der Besitzer eines Flugzeugs dessen entledigen will oder entledigen muss [28], ist der Erzeuger oder der Besitzer von Abfällen zur ordnungsgemäßen Entsorgung, möglichst Verwertung, seiner Abfälle verpflichtet. Diese Verwertung von Abfällen hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen, wie im weiteren Prozess auf Grundlage der dargelegten Abfallhierarchie dargestellt [28].

Der größte Wert in einem abgeschriebenen Altflugzeug liegt in den Triebwerken, dem Fahrwerk und der Avionik. An diesem Punkt gilt es zu prüfen, ob sich eine wirtschaftliche und technische Wiederverwendung der Komponenten durch direkte Wiederverwendung oder eine Runderneuerung (Refurbishing) von den Komponenten mit einem gleichen Qualitätsstandard auf Basis der wirtschaftlichen Zumutbarkeit umsetzen lässt [28]. Die runderneuerten und luftfahrtzertifizierten Komponenten haben nach ihrer Überprüfung und ggf. Instandsetzung, durch einen Part 145 MRO - Betrieb ausreichend Laufzeit und können dadurch wie ein neues Bauteil eingesetzt werden.

Das Flugzeug kann als „fliegende Ersatzteilquelle“ für andere Flugzeuge betrachtet werden, ist aber unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten auch ein wertvoller Lieferant für Sekundärrohstoffe, vgl. Abbildung 15. Im Falle einer negativen technischen und monetären Bewertung wird sich der Besitzer seines Flugzeuges entledigen wollen und das Verbundmaterial kann dem Bereich der Aufbereitung zugeführt werden. Es ist an diesem Punkt eine hochwertige Verwertung der Sekundärrohstoffe anzustreben. Die nicht verwertbaren Abfälle sind so zu beseitigen, dass das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird [28].

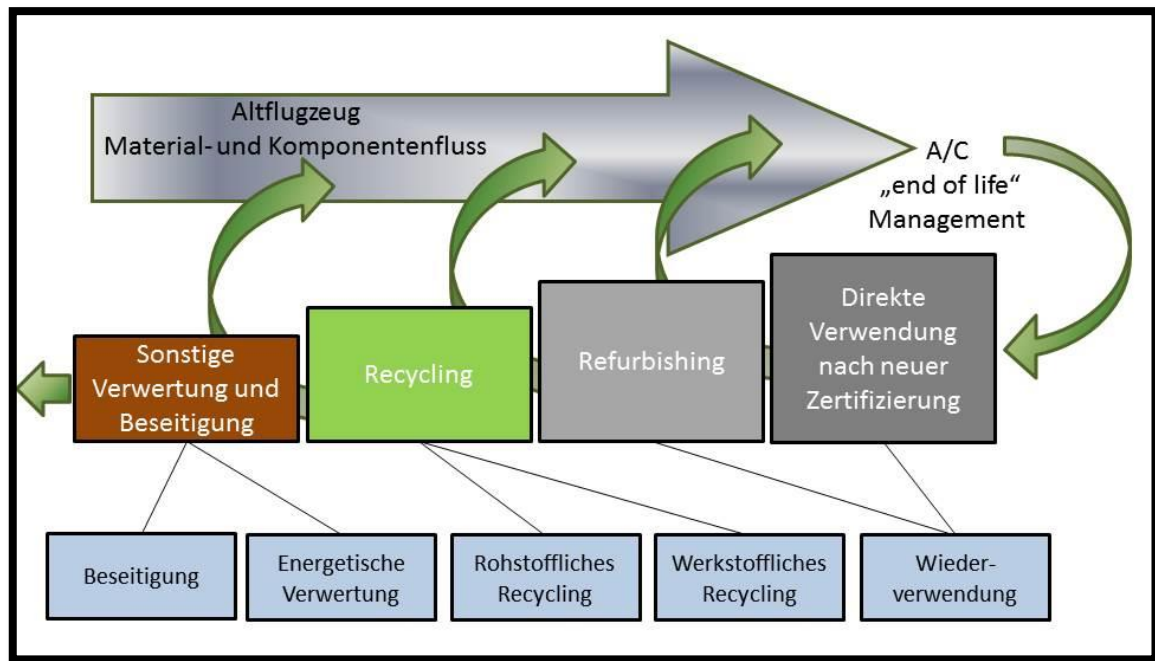


Abbildung 15: Mögliche Kreisläufe im Altflugzeugbereich entsprechend der Abfallhierarchie (eigene Darstellung)

3.2.2 Abfallrechtliche Nachweisführung in Deutschland

Die Dokumentation des Umgangs mit gefährlichen Abfällen (und im Einzelfall mit weiteren nicht gefährlichen Abfällen) ist durch eine gesetzliche abfallrechtliche Nachweisführung im Kreislaufwirtschaftsgesetz (insbesondere § 50 - 52) und in der Nachweisverordnung [30] geregelt. Was gefährliche Abfälle nach § 3 Abs. 5 KrWG sind, definiert die Abfallverzeichnisverordnung (AVV). Das KrWG ermächtigt den Gesetzgeber zur Definition weiterer gefährlicher Abfälle.

Über die ordnungsgemäße Entsorgung der gefährlichen Abfälle müssen alle Betroffenen, d.h. Erzeuger, Besitzer, Sammler, Beförderer und Entsorger, der zuständigen Behörde und sich untereinander ausführliche Informationen zur Nachweisführung darlegen. Es wurde daher in den meisten Bundesländern eine sogenannte Andienungs- oder Überlassungspflicht für bestimmte gefährliche Abfälle zur Beseitigung (z. B. Asbest und Dämmmaterial) eingeführt. Der Weg des gefährlichen Abfalls von der Abfallerzeugung über den Transport bis zur Aufbereitung oder Entsorgung wird mittels Nachweisen auf eine ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder Beseitigung dokumentiert. Als Nachweisführung werden dem gefährlichen Abfall Entsorgungsnachweise, Begleitscheine und Übernahmescheine beigelegt.

Der Entsorgungsnachweis ist der Beleg für die Zulässigkeit der Entsorgung vor Beginn der Abfallentsorgung. Dafür muss der geplante Entsorgungsweg vorab geprüft sein [31]. Für den Fall, dass die Abfallmengen unter 20 t pro Jahr und Abfallart liegen, kann der Sammelnachweis eines beauftragten Einsammlers genutzt werden [31].

Der Begleitschein dient der tatsächlichen Übergabe vom Abfallerzeuger, über den Beförderer bis hin zum Entsorger. Dadurch ist es möglich den Abfall lückenlos zu verfolgen [31]. Für jede Abfallcharge ist ein eigener Begleitschein auszufüllen. Alle Beteiligten und die Behörden erhalten Durchschläge zum Nachweis [31]. Der Begleitschein beinhaltet Angaben über:

- Abfallbezeichnung, Abfallschlüssel und Menge
- Herkunft (Abfallerzeuger)
- Transportweg (Abfallbeförderer)
- Verbleib (Abfallentsorger) [31]

Bei einem Sammelbegleitschein muss die Sammelentsorgungsnachweisnummer und die Nummern der Übernahmescheine angegeben werden, aus der sich die Ladung zusammensetzt. Der Übernahmeschein ist vom Abfallerzeuger sowie vom Einsammler bei Übernahme des Abfalls auszufüllen. Der Einsammler übernimmt den Abfall mit der Ausfertigung 2 des Übernahmescheins, die Ausfertigung 1 ist der Beleg für den Abfallerzeuger [31]. Der Übernahmeschein ist während des Transports mitzuführen.

Dieses Nachweisverfahren gilt für gewerbliche Abfallerzeuger, Abfallbeförderer und Abfallentsorger [31]. Seit dem 1. April 2010 wurde die Nachweisführung von der Papierform auf die elektronische Nachweisführung umgestellt, siehe Tabelle 5.

Tabelle 5: Nachweisführung für gefährliche Abfälle

Wer	Erzeuger	Einsammler	Beförderer	Entsorgungsanlage
Entsorgungsnachweis	E			E
Sammelentsorgungsnachweis		E		E
Begleitschein	E		E	E
Sammelbegleitschein		E	E	E
Übernahmeschein	P oder E	P oder E		

= Papierform, E= elektronische Form

3.2.3 Altfahrzeugverordnung

Es ist nicht auszuschließen, dass analog zur Altfahrzeugverordnung [32] eine Verordnung für Altflugzeuge mit definierten Recyclingquoten erlassen wird. Im Zentralen Fahrzeugregister (ZFZR) des Kraftfahrt-Bundesamtes waren in Deutschland am 1. Januar 2015 insgesamt ca. 44,4 Mio. [33] PKW registriert. Die Altfahrzeuge enthalten einen nicht unwesentlichen Massenstrom an Sekundärrohstoffen, der bei zertifizierten Demontagebetrieben anfällt. Die registrierten Fahrzeuge in Deutschland haben bei einem angenommenen mittleren Gewicht von 1,5 t und einer durchschnittlichen Lebenserwartung von 12 Jahren ein Materialpotenzial von ca. 5,43 Mio. t pro Jahr. Im Vergleich dazu liegt die weltweite Materialmenge der Altflugzeuge nur bei geschätzten verfügbaren 24.000 - 38.000 t pro Jahr. Hierbei sind allerdings die zum Teil deutlich höheren Materialwerte zu berücksichtigen. Es gilt aber nicht nur diese Werte zu betrachten. In einem Altfahrzeug befinden sich auch gefährliche Stoffe, wie Blei in Batterien, Altöl, Kältemittel aus Klimaanlage, pyrotechnische Sätze usw., die einer umweltkonformen Verwertung oder Beseitigung zugeführt werden müssen. In ähnlicher Weise gilt dies für Altflugzeuge.

In der Bundesrepublik Deutschland wird der rechtliche Rahmen für die Entsorgung von Altfahrzeugen durch die Altfahrzeug-Verordnung vorgegeben, die das Kernstück der deutschen Umsetzung der EG-Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG darstellt. Wenn sich ein Besitzer eines Fahrzeugs entledigt, entledigen will oder entledigen muss, ist das Fahrzeug nach § 3 Absatz 1 Kreislaufwirtschaftsgesetz ein Altfahrzeug. Das bedeutet wiederum, dass der Hersteller das Altfahrzeug von dem Letzthalter an einer anerkannten Rücknahmestelle oder einem De-

montagebetrieb zurücknehmen muss. Des Weiteren müssen seit dem 1. Januar 2006 bei der Entsorgung der Altfahrzeuge eine Wiederverwendungs- und Verwertungsquote von mindestens 85 % bzw. eine Wiederverwendungs- und stoffliche Verwertungsquote von mindestens 80 % erreicht werden, jeweils bezogen auf das durchschnittliche Fahrzeugleergewicht aller Altfahrzeuge. Die Quoten wurden zum 1. Januar 2015 mit einer Wiederverwendungs- und Verwertungsquote von 95 % und einer Wiederverwendungs- und stofflichen Verwertungsquote von mindestens 85 % verschärft [32].

Um aus Fahrzeugsicht die Voraussetzungen dafür zu schaffen, dass diese gesetzlich geforderten Verwertungsquoten eingehalten werden können, müssen die Fahrzeughersteller vor dem Bau eines neuen Fahrzeugs im Rahmen der Typgenehmigung eine Recyclingfähigkeit bzw. Verwertungsfähigkeit in entsprechender Höhe (85 % bzw. 95 %) nachweisen [32]. Die Altfahrzeugverordnung gilt nicht für Flugzeuge, könnte aber als mögliche Grundlage für Altflugzeuge verwendet werden.

3.2.4 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) hat den Zweck die Lebensgrundlage des Menschen und den Lebensraum für Tiere und Pflanzen durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung zu schützen. Der Anwendungsbereich für das WHG sind die oberirdischen Gewässer, die Küstengewässer und das Grundwasser.

Die Altflugzeuge können weltweit auf Flugplätzen geparkt sein, daher müssen vor Projektbeginn der Zustand des Altflugzeugs, die Rückbaufläche und das Umfeld genau geprüft werden. Die Betriebsmittel (Kerosin, Hydraulikflüssigkeiten, Öle usw.) müssen so abgepumpt und entsorgt werden, dass keine Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit eintreten kann [34]. Der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ist im WHG explizit beschrieben. Die Enttanksanlage zum Trockenlegen des Altflugzeugs muss so beschaffen sein, dass keine nachteilige Veränderung von Gewässern zu befürchten ist [34]. Der Geltungsbereich des WHG ist nur Deutschland. In anderen Regionen / Ländern werden evtl. geringere Anforderungen gelten. Der Vorsorge-Grundsatz aus dem WHG ist natürlich übertragbar.

3.2.5 ATEX Betriebsrichtlinie 1999/92/EG

ATEX leitet sich aus der französischen Abkürzung ATmosphère EXplosibles ab. ATEX ist ein Synonym für das Amtsblatt der Europäischen Union, das sich zurzeit in folgenden Richtlinien wiederfindet:

- ATEX - Produktrichtlinie 94/9/EG
- ATEX - Betriebsrichtlinie 1999/92/EG

Ein Flugzeug enthält in der Regel mind. drei Treibstofftanks (zwei Flügeltanks und ein Centertank) und diverse Hydrauliköltanks. Beim Enttanken und Belüften dieser Speichersysteme entstehen explosionsfähige Gasgemische im und um das Flugzeug herum. In diesen Bereichen müssen besondere Schutzmaßnahmen für die Sicherheit und Gesundheit der Mitarbeiter getroffen werden [35]. Die explosionsgefährdeten Bereiche werden nach Häufigkeit und Dauer der explosionsfähigen Atmosphäre in Zonen eingeteilt. Der gefährlichste Bereich ist die Zone 0, in der ständig eine explosionsfähige Atmosphäre präsent ist. Die Zone 1 zeigt eine gelegentliche explosionsfähige Atmosphäre auf und die Zone 2 keine oder nur eine kurzzeitige. Bei den Rückbauprojekten müssen die Anforderungen des Anhangs 2 der Richtlinie 1999/92/EG berücksichtigt werden. Zum einen sind das die organisatorischen Maßnahmen durch Unterweisung und schriftliche Anweisung der Mitarbeiter. Zum anderen sind technische Explosionsschutzmaßnahmen einzuhalten und die Erfüllung der Kriterien für die Auswahl von Geräten und Schutzmaßnahmen sicherzustellen.

3.2.6 Atomgesetz, Strahlenschutzverordnung und Röntgenverordnung

In einem Altflugzeug fallen auch radioaktive Bauteile, wie z. B. Rauchmelder (auch ohne Baumusterprüfung) oder Ausgleichs- und Ballastgewichte, zur Entsorgung an. Diese radioaktiven Materialien unterliegen nicht dem KrWG (im Kapitel 3.2.1 beschrieben). Der Umgang (Aufbereitung, Behandlung und Endlagerung) für diese anfallenden radioaktiven Abfälle in Altflugzeugen ist im Atomgesetz (AtG) [29] geregelt.

Für einen professionellen rechtskonformen Umgang und eine entsprechende fachliche Bewertung von technischen und organisatorischen Maßnahmen für den Umgang mit radioaktiven Stoffen und ionisierender Strahlung empfiehlt sich ein Strahlenschutzbeauftragter (SSB) mit entsprechender Fachkunde gemäß

Strahlenschutzverordnung (§ 30 StrlSchV). Der SSB unterstützt auch die Fachkraft für Arbeitssicherheit (FaSi) mit den entsprechenden Gefährdungsbeurteilungen und kann mit Funktionskontrollen und entsprechenden Freimessungen die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen prüfen. Der SSB ist auch verantwortlich für die Sensibilisierung der Mitarbeiter beim Umgang mit entsprechenden kontaminierten Materialien bei den Rückbauprojekten. Weiterhin wird bei der Bedienung der Röntgenfluoreszenz-Analysatoren (RFA-Analysatoren) zum Detektieren und Vorsortieren der entsprechenden Materialien vor Ort eine Fachkunde gemäß Röntgenverordnung (§ 13 RöV Abs. 3) benötigt.

3.2.7 Arbeitssicherheit

Die Sicherheit der beschäftigten Mitarbeiter in den Unternehmen steht im Vordergrund. Die gesetzliche Grundlage dafür bilden in Deutschland das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) [36], Siebtes Buch Sozialgesetzbuch – Gesetzliche Unfallversicherung– (SGB VII) [37] und das Gesetz über Betriebsärzte, Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit (ASiG) [38]. Auch beim internationalen Altflugzeugrecycling bzw. bei Recyclingprojekten sind die einschlägigen nationalen Vorschriften einzuhalten, um die Sicherheit der dort arbeitenden Menschen zu gewährleisten.

4 Einteilung von Fluggeräten

Der Einteilung von Flugzeugen/Fluggeräten sind grundsätzlich wenig Grenzen gesetzt. Durch den internationalen Betrieb haben sich verschiedene Definitionen durchgesetzt. Mögliche Einteilungen von Fluggeräten sind beispielhaft über folgende Parameter möglich:

- Auftrieb
- Masse
- Größe
- Kurzstrecke, Mittelstrecke und Langstrecke
- Lärmklasse gem. AzB 08
(Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen 2008) [39]
- Wirbelschleppenkategorie gemäß Dokument ICAO 8643 [40]

Eine erste grundsätzliche Einteilung der Luftfahrzeuge kann in zwei Kriterien vorgenommen werden. Zum einen in Luftfahrzeuge, die leichter als Luft sind und mit einem statischen Auftrieb arbeiten, wie z. B. Ballone. Diese Luftfahrzeuge fahren in der Luftfahrtsprache durch die Luft. Zum anderen die Luftfahrzeuge, die schwerer als Luft sind und mit einem dynamischen Auftrieb durch eine Antriebseinheit einen Vorschub erzeugen und dadurch fliegen. Ausgenommen sind Segelflugzeuge, die keinen eigenen Antrieb haben, aber durch eine Zugmaschine in die Luft gezogen werden. In Abbildung 16 ist eine Übersicht der Fluggeräte entsprechend ihrer Einteilungen abgebildet. Der Schwerpunkt der betrachteten Flugzeugmuster liegt vorwiegend auf Starrflügelflugzeugen, die auf der rechten Seite der Grafik aufgezählt sind. Der Hintergrund ist, dass sich in diesem Bereich die Hauptmasse der Fluggeräte befindet. Im Rahmen dieser Arbeit werden hauptsächlich Flugzeuge im Bereich mit mehr als 100 Passagiersitzen im Narrow-Body und Wide-Body Bereich betrachtet. Es werden in diesem Abschnitt weitere Einteilungsmöglichkeiten der Flugzeuge auf Basis des Gewichts und der Größe dargelegt.

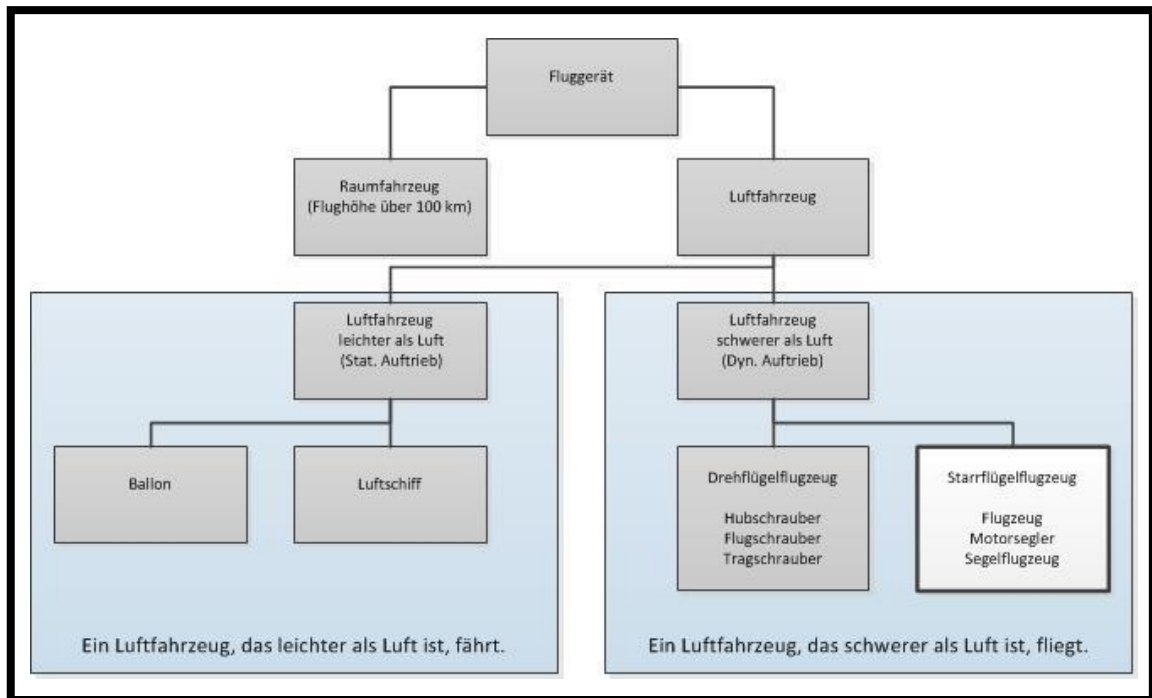


Abbildung 16: Übersicht der Fluggeräte [41]

4.1 Einteilungsmöglichkeiten nach Gewicht

Flugzeuge unterscheiden sich in Bezug auf Wide- und Narrow Bodies in den großen Dimensionen (Abmaße, Masse und Volumen) und den eigentlichen Antriebssystemen von Kraftfahrzeugen. Ein durchschnittliches Gewicht eines BMW beträgt ca. 1,5 t [42], das mittlere Gewicht von Flugzeugen beträgt mit 70,2 t [43] mehr als das 46-fache. In der Luftfahrt werden die Flugzeuge mit hohen Sicherheitsauflagen und dem Fokus auf einen sehr langen Lebenszyklus von 20 - 30 Jahren zum sicheren Fliegen ausgelegt. Kraftfahrzeuge hingegen werden mit 12 - 15 Jahren im Durchschnitt halb solange betrieben [44].

Auf Basis der International Civil Aviation Organization (ICAO) Doc. 8643 werden Flugzeuge beispielhaft in Höchstabfluggewicht (MTOW) Kategorien unterteilt [40]. Hintergrund ist die Wirbelschleppenbildung hinter den Tragflächen, die den nachfolgenden Flugverkehr gravierend stören könnte.

Light:	MTOW	< 7t
Medium	MTOW	7t - 136t
Heavy	MTOW	> 136t
Super Heavy	z. B. Airbus A380- 800, MTOW 569t	

Auf Basis der Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO) [45] sind Flugzeugmuster auf Grund von Gewichtsgrenzen (max. Abfluggewicht) mit einer entsprechenden Kennzeichnungs-kategorie deklariert. Deutsche Flugzeuge, Drehflügler, Luftschiffe, Motorsegler und bemannte Ballone führen als Staatszugehörigkeitszeichen die Bundesflagge und den Buchstaben D sowie als besondere Kennzeichnung (Eintragungszeichen) vier weitere Buchstaben.

Folgende Buchstaben werden als führende Eintragungszeichen als Kennzeichnungs-kategorie gewichtsbezogen verwendet:

Tabelle 6: Einteilung von Flugzeugen nach Verkehrszulassung (gewichtsbezogen) [45]

Flugzeugmuster	Gewichtsgrenzen der Flugzeuge	Kennzeichnungs-kategorie
Flugzeuge	Über 20.000 kg höchstzulässige Startmasse	A
Flugzeuge	Von 14.000 bis 20.000 kg	B
Flugzeuge	Von 5.700 bis 14.000 kg	C
		D, Nicht vergeben
Flugzeuge einmotorig	Bis 2.000 kg	E
Flugzeuge einmotorig	Von 2.000 bis 5.700 kg	F
Flugzeuge mehrmotorig	Bis 2.000 kg	G
Flugzeuge mehrmotorig	Von 2.000 bis 5.700 kg	I

In Tabelle 6 sind die verschiedenen Flugzeuge mit ihren dazugehörigen Gewichts- und Kennzeichnungs-kategorien aufgeführt. In Tabelle 7 sind vollständigkeitshalber auch Flugzeugmuster aufgeführt, die in der vorliegenden Arbeit nicht betrachtet werden. Daher wurde auch weitestgehend auf die Betrachtung der Gewichtsgrenzen verzichtet.

Tabelle 7: Kennzeichnung von anderen Luftfahrzeugen [45]

Flugzeugmuster	Gewichtsgrenzen der Flugzeuge	Kennzeichnungs-klasse
Drehflügler		H
		J, Nicht vergeben
Motorsegler		K
Luftschiffe		L
Ultraleichtflugzeuge motorge- trieben	Bis 472,5 kg Höchstabflugmasse	M
Ultraleichtflugzeuge nichtmo- torgetrieben		N
Bemannte Gas- und Heißluftbalone		O

In Abbildung 17 ist ein Airbus A320 - 232 des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) abgebildet. Die beschriftete Kennzeichnungs-klasse **D-ATRA** ist der Manufacturer Serial Number (MSN) 659 zugeordnet. Das **D** steht für die Anmeldung in Deutschland und das **A** für die Gewichtsgrenze von mehr als 20 t. Der Airbus A320 hat ein Leergewicht von ca. 42 t und ist der Klasse A zuzuordnen. Die Buchstaben TRA sind dem Eigentümer des Flugzeugs nach Abstimmung mit dem LBA zugeteilt worden. DLR hat dem Forschungsflugzeug ATRA die Bedeutung, Advanced Technology Research Aircraft [46], gegeben. An dem Rumpf ist weiterhin die Bundesflagge zu sehen, die auf beiden Seiten geführt werden muss.



Abbildung 17: Beispielhafte Kennzeichnung Airbus A320-232 D-ATRA DLR [47]

4.2 Einteilungsmöglichkeiten nach Größe

Eine weitere verbreitete Möglichkeit der Unterscheidung von Flugzeugen ist die Unterteilung in Großraumflugzeuge (Wide-Bodies oder Twin Aisles) und die eines Standardrumpfflugzeuges (Narrow-Bodies oder Single Aisles). Außerdem kommen die kleineren Flugzeuge aus dem Businessjet Segment hinzu. In Abbildung 18 ist der Direktvergleich auf einem Bild aus dem Airliners.net Forum dargestellt.



Abbildung 18: Größenvergleich Business-Jet, Narrow Body und Wide Body [48]

Der Wide-Body ist ein Verkehrsflugzeug mit einem Rumpfdurchmesser von mehr als 5 m und mind. zwei Gangbereichen in der Passagierkabine.

Tabelle 8: Typische Wide-Body Kenngrößen [49]

Flugzeugmuster	Besatzung	Passagiere	Flugstrecke [km]
Airbus A310 - 200/300	9-20	280	8050
Airbus A330 - 200/300	9-20	440	10.400
Boeing B777	9-20	350	10.593
Boeing B767 - 300/400	9-20	350	10.880
Boeing B747-100/200/300/400	9-20	390-430	13.000

Der Narrow Body ist ein Verkehrsflugzeug mit einem Rumpfdurchmesser von 3 - 4 m und nur einem Gangbereich zwischen den Passagiersitzen. Diese Maschinen benötigen eine Besatzung von 5 - 10 Personen, können bis ca. 145 Passagiere aufnehmen und eine Flugstrecke von ca. 2.700 km zurücklegen. Beispiele für diese Flugzeugklasse sind Airbus A319, A320 und Boeing B707, B717, B727, B737 [50].

Wesentlich kleinere Flugzeugmuster sind die Businessjets, wofür es aber keine genaue Definition, bezogen auf den Rumpf gibt. Diese Flugzeugmuster werden von privaten Personen, größeren Unternehmen im Werkflugverkehr oder im Linienverkehr von Charter-Unternehmen genutzt. Die Modellklasse wird z. B. von Bombardier, Piper, Cessna und Beechcraft hergestellt und vertrieben.

5 Aufbau von Flugzeugen

Dieses Kapitel vermittelt einen detaillierten Überblick über den konstruktiven Aufbau von Flugzeugen, um nachfolgend näher auf die einzelnen Konstruktionsgruppen einzugehen. Abschließend wird die Kennzeichnung der Bauteile erläutert, welche für Demontageunternehmen eine essenzielle Lokalisierungshilfe darstellt.

5.1 Konstruktiver Aufbau von Flugzeugen

Flugzeuge können auf Basis der DIN 9020 [51], Luft- und Raumfahrt, Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft, Massehauptgruppen und Massebegriffe, in drei Konstruktionshauptgruppen und zwölf Konstruktionsgruppen unterteilt werden, siehe Abbildung 19. Die Konstruktionshauptgruppen können in die Struktur, die Triebwerksanlage und die Ausrüstung aufgeteilt werden. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Ausbau der wiederverwendbaren Hochwertteile (Komponenten, wie z B. einfache Bauteile, wie Ventile bis hin zu komplexen Systemen, wie beispielsweise der Triebwerksanlage), der Entfrachtung der gefährlichen Bauteile und dem Recycling der verwendeten Materialien im Bereich der Struktur. In diesem Abschnitt werden die Struktur des Rumpfwerks, des Tragwerks (Tragflügel), des Leitwerks und des Fahrwerks mit den verwendeten Materialien genauer betrachtet.

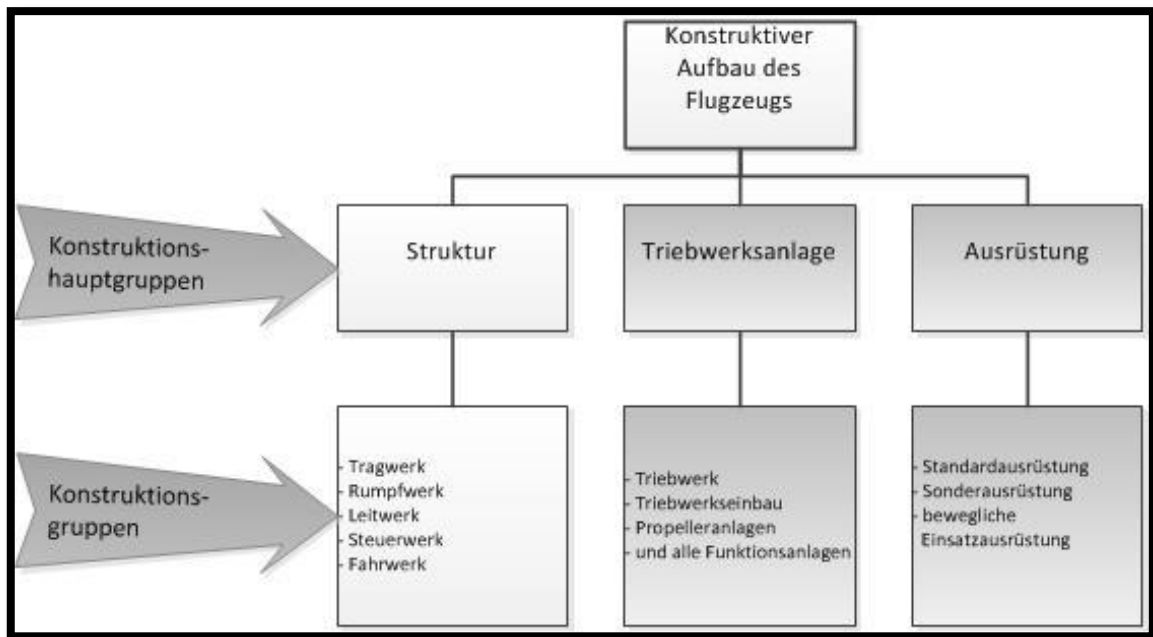


Abbildung 19: Flugzeug unterteilt in Konstruktionshauptgruppen und Konstruktionsgruppen [41]

Im Bereich des Altflugzeugrecyclings werden überwiegend Narrow- und Wide-Body-Verkehrsflugzeuge betrachtet. Die Flugzeuge haben abhängig vom Gewicht bestimmte Zulassungsvoraussetzungen. Die EASA definiert ein „Large Aircraft“ als Luftfahrzeug mit einer maximalen Abflugmasse von mehr als 5.700 kg [52]. Die geltende Zulassungsvorschrift für diese Flugzeuge ist die EASA CS-25 [53]. Im amerikanischen Bereich gilt hierfür die Rechtsvorschrift 14 CFR Part 25 [54]. Die Aufrechterhaltung der Lufttüchtigkeit wird auf Grundlage des EASA Part-M (Continuing Airworthiness) [55] geregelt. Der EASA Part-145 (Maintenance Organisation Approvals) [56] beschreibt die Regelungen für die Flugzeugwartung und Überholung sowie die dafür verantwortlichen Part 145 MRO-Betriebe. Der EASA Part-66 (Certifying Staff) [57] und Part-147 (Maintenance Training Organisation Approvals) [58] regelt die Anforderungen an das vorzuhaltende Personal und an dessen Ausbildung.

Die gemäß Zulassungsvorschriften vom Hersteller bereitzustellende Flugzeugdokumentation ist nach einer definierten Systematik in ATA-Kapitel (Air Transport Association) unterteilt. Es werden die technischen Einrichtungen des Flugzeugs nach ATA-Kapiteln geordnet und in entsprechende Gruppen sowie Untergruppen eingeteilt. Eine Definition der ATA-Kapitel ist in der

ATA 100 beschrieben. Die ATA 100 wird seit dem Jahr 2000 digitalisiert und soll zukünftig in die Version iSpec 2200 übernommen werden.

Die ATA-Kapitel [59] sind in fünf Hauptgruppen unterteilt:

Aircraft, General	Flugzeuge, Allgemeines	Kapitel 00 - 19
Airframe Systems	Flugzeugzelle	Kapitel 20 - 50
Structure	Flugzeugstruktur	Kapitel 51 - 69
Engines	Triebwerke	Kapitel 70 - 81
Miscellaneous	Verschiedenes	Kapitel 82 - 116

Es wird im folgenden Abschnitt eine Einteilung auf Basis von drei Hauptsektionen eines Flugzeugs unternommen. Die Inhalte sind in den ATA-Kapiteln Flugzeugstruktur 51 - 57 des betrachteten Flugzeugmusters zu finden. Es werden der Rumpf (Kapitel 53), die Leitwerke (Kapitel 55) und die Tragflügel (Kapitel 57) genauer untersucht sowie beschrieben, wodurch eine genaue Lokalisierung von bestimmten Komponenten und Bauteilen erfolgen kann. Dadurch können z. B. auch Gefährdungen durch Gefahrstoffe besser lokalisiert werden.

Strukturiert nach der ATA-100 Spezifikation und den daraus abgeleiteten ATA Übersichtsplänen werden die Hersteller-, Wartungs- und Reparaturhandbücher angelegt. Zur Informationsgewinnung der technischen Flugzeugdaten können insbesondere folgende Handbücher der Flugzeugdokumentation für das jeweilige Flugzeugmuster verwendet werden:

- AMM (Aircraft Maintenance Manual)
- IPC (Illustrated Parts Catalogue)
- SRM (Structure Repair Manual)
- ARM (Aircraft Recovery Manual)
- CMM (Component Maintenance Manual)
- TEM (Illustrated Tool and Equipment Manual)
- WBM (Weight and Balance Manual)

Der Kapitelaufbau dieser Handbücher ist durch die Strukturierung nach der ATA-100 Spezifikation sehr ähnlich. Dadurch wird die Benutzung der Handbücher sehr übersichtlich und anwenderfreundlich.

5.2 Struktur

Die Struktur eines Flugzeugs gem. DIN 9020 besteht aus dem Rumpf (bzw. Rumpfwerk), den Flügeln (auch Tragflügel oder Tragwerk), den Leitwerken (Höhen- und Seitenleitwerk oder ganzheitlich zusammengefasst Leitwerk) und dem Fahrwerk. Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Strukturbauteile beschrieben. Damit wird in den folgenden Kapiteln ein Überblick über die Lokation der Baugruppen und der Materialien gewonnen.

5.2.1 Rumpf

Die Aufgabe des Rumpfes besteht im Wesentlichen darin, ein Volumen für die Aufnahme von Passagieren oder Fracht bereitzustellen. Konstruktiv ist der Rumpf das Bindeglied für Flügel und Leitwerke. Wegen der Konzentration der Kräfte muss eine hohe Festigkeit gewährleistet sein bei geringstmöglichem Gewicht [60]. Zudem bildet der Rumpf die Verbindung zu den Fahrwerken. Der Rumpf kann in verschiedenen Querschnitten gebaut werden:

- Kreisrumpf (z. B. Single Aisle oder Businessjets)
- Ellipsenrumpf (z. B. Airbus A380)
- Doppelrumpf (z. B. Boeing B747)

Die Rumpfstruktur eines konventionellen Flugzeugs besteht aus Spanten und Stringern. Die Spanten, typischerweise Z-Profile, verlaufen in Umfangsrichtung. An ihnen sind die Stringer befestigt, die in die Längsrichtung verlaufen. Diese Konstruktion ergibt das Flugzeuggerippe, vgl. Abbildung 20.

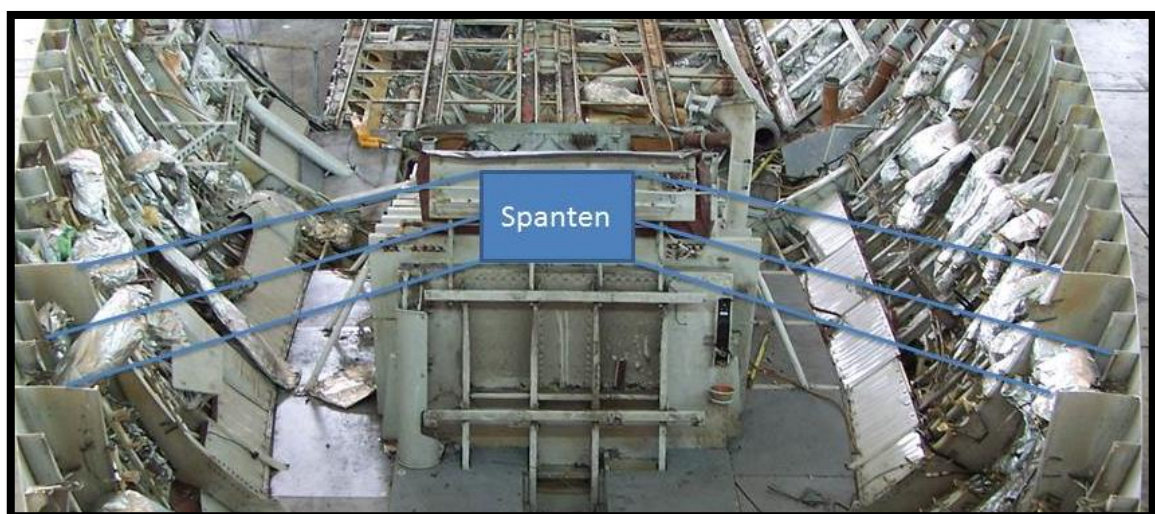


Abbildung 20: Airbus A300 Rumpfunterschale mit Spanten [61]

Dieses Gerippe wird dann mit der Flugzeughaut aus z. B. Aluminiumblechen bespannt. In Abbildung 21 ist diese Struktur beispielhaft an einem Airbus A300 - B4 erkennbar. Derzeit besteht der Trend in der Entwicklung und beim Bau neuer Flugzeugmuster (z. B. Boeing B787 und Airbus A350) darin, dass bei weiten Bereichen dieser Struktur das Aluminium durch Kohlefaserverbundwerkstoffe substituiert wird.



Abbildung 21: Beispielhafte Flugzeugstruktur Airbus A300 - B4 (eigene Darstellung)

Ein Flugzeug ist in verschiedene Sektionen unterteilt. Die einzelnen Rumpfsektionen sind im Structure Repair Manual (SRM) unter ATA Kapitel 53 zu finden und in Abbildung 22 beispielhaft dargestellt. Die Sektionen werden in folgende Bereiche eingeteilt:

- Nose Forward Fuselage
- Forward Fuselage
- Center Fuselage
- Rear Fuselage
- Cone / Rear Fuselage

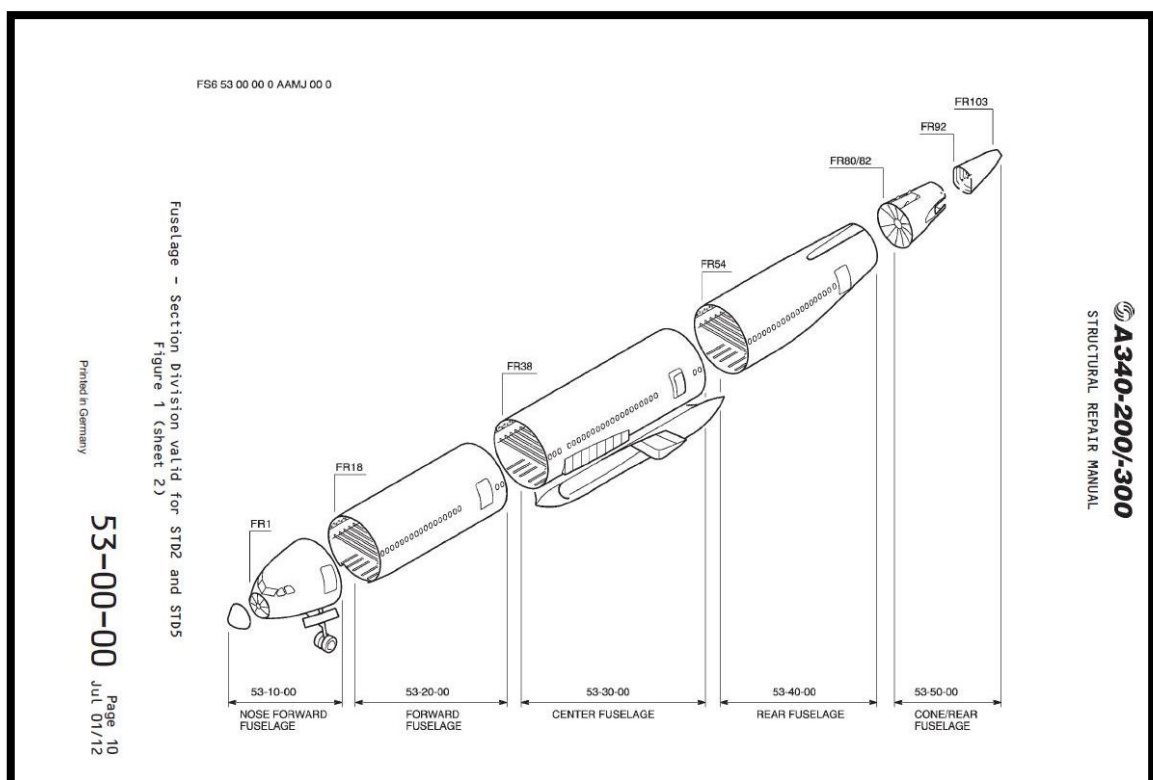


Abbildung 22: Rumpfsektionen Airbus A340 [62]

Eine weitere und spezifischere Unterteilung eines Flugzeugs wird im SRM nach Sektionen dargestellt. In den Wartungshandbüchern (AMM) sind Querverweise als Lokalisierungshilfestellung gegeben. Zur eindeutigen Identifizierung steht meist der Buchstabe Z vor der Zone. Der Bereich unter dem Cockpit mit dem Avionic Compartment wird z. B. mit Z 121 bezeichnet, siehe Abbildung 23.

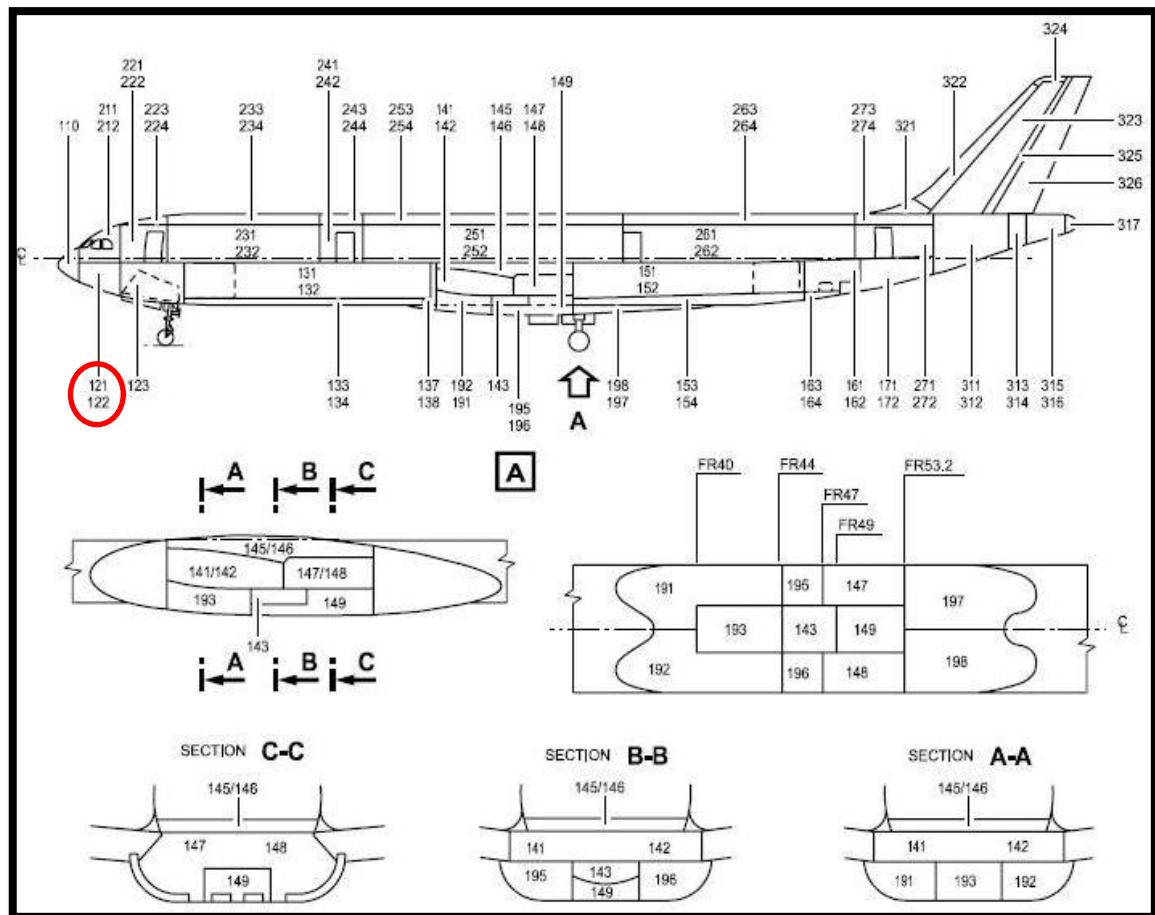


Abbildung 23: Zonen eines Flugzeugrumpfs [62]

Prinzipiell ist bei den hier betrachteten Flugzeugmustern der innere Bereich des Flugzeugrumpfs in einen Passagierbereich (Kabine) und einen darunter liegenden Frachtbereich (Frachtraum) getrennt, siehe hierzu Abbildung 24. Weiterhin befinden sich in der Kabine das Cockpit, die Küchen (Galleys) und die Toiletten. Oberhalb der Passagiersitze befinden sich noch die Overhead Stowages (Bins) für das Handgepäck, das Sicherheitsequipment, sowie Bau-teile des Bordunterhaltungssystems und der Kabinenluftanlage.

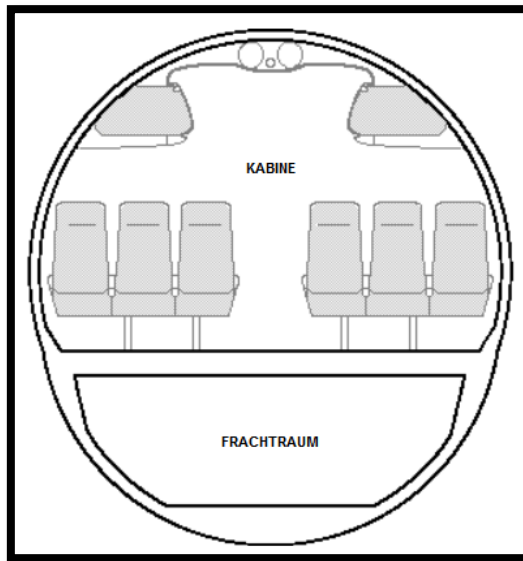


Abbildung 24: Querschnitt durch einen Flugzeugrumpf [63]

Im unteren Bereich des Flugzeugrumpfs befindet sich neben dem Frachtraum das Avionic Compartment, das auch als Electronic and Equipment Compartment kurz E&E Compartment bezeichnet wird. In manchen Flugzeugen gibt es auch mehrere E&E Compartment-Bereiche.

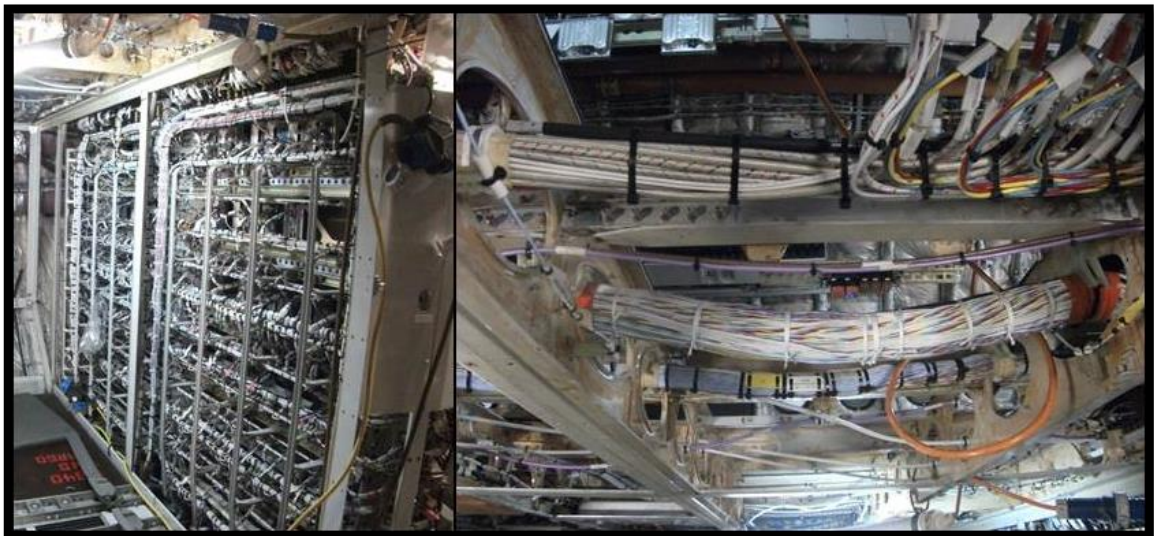


Abbildung 25: E&E Compartment mit Verkabelung eines Airbus A340 - 300 (eigene Darstellung)

Für eine noch detailliertere Unterteilung, die dann auch als weitere spezifische Ortsangabe verwendet werden kann, wird im SRM noch eine Unterteilung nach Spanten vorgenommen. Hierfür dient die Angabe FR (Frame) vor der entsprechenden Nummer des Spantes, siehe Abbildung 26.

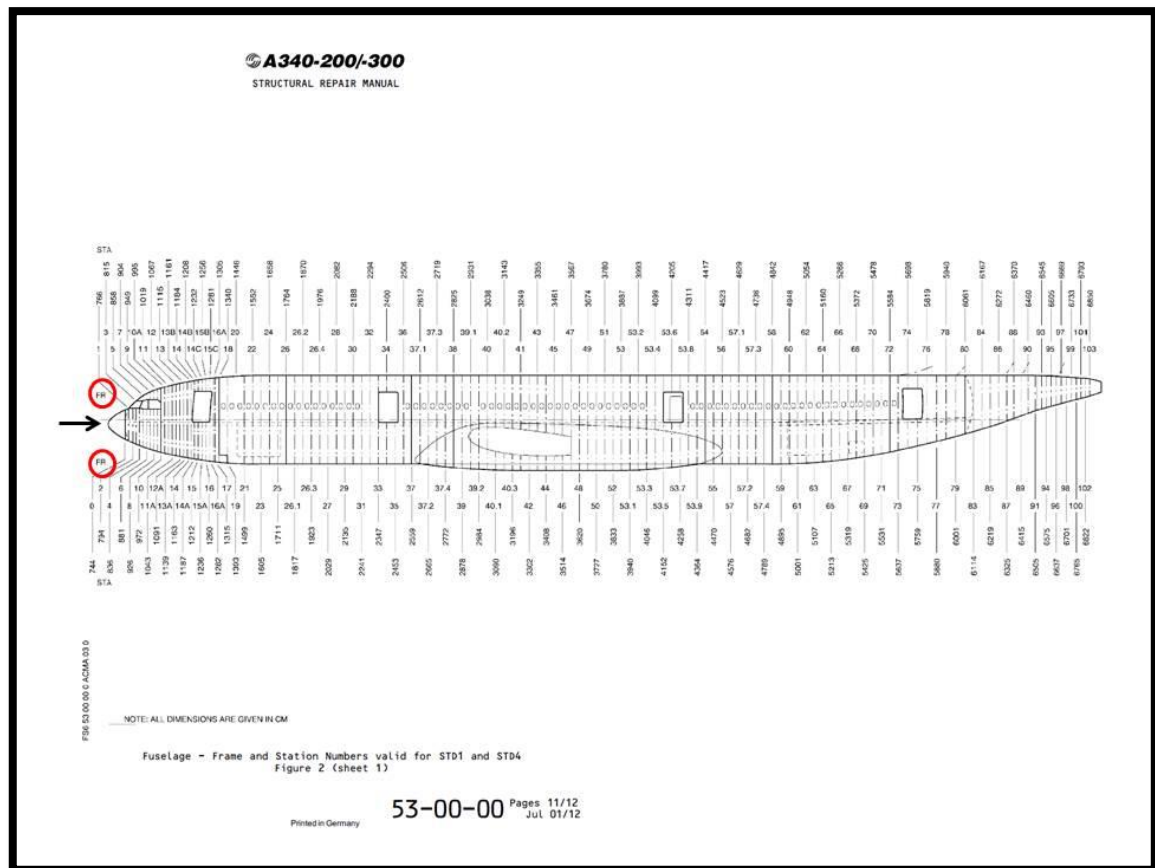


Abbildung 26: Spantenplan eines Airbus A340 [62]

Durch diese genaue Definition der Lokalisierung auf Grundlage der ATA-Kapitel ist es dem technischen Personal möglich, die Bauteile und Komponenten direkt in einem Flugzeug zu finden und auf Basis der Betriebsanweisungen zu überprüfen, instand zu setzen oder auszutauschen. Im Rahmen dieser Sektions- und Spantenpläne ist es auch möglich, dass mit dem Flugzeuggückbau betrautes Personal auf speziell verbaute Verbundmaterialien und Gefährdungen im Rahmen der Projektvorbereitung und Unterweisung aufmerksam gemacht wird. Mit Ausnahme der Flugzeugmuster Boeing B787 und Airbus A350 stellt nach wie vor Aluminium das Hauptkonstruktionsmaterial der hier betrachteten Flugzeugmuster dar.

Beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Rumpfbereich:

Die folgende Tabelle 9 beschreibt beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Bereich des Rumpfs (Fuselage) auf Basis ausgewählter Flugzeugmuster. Der Schwerpunkt der verwendeten Legierungen der Flugzeughaut (Skin) liegt im Bereich der 2XXX-Legierungen, für die verwendeten Spanten und Stringer werden vorwiegend 7XXX-Legierungen eingesetzt.

Tabelle 9: Für die Rumpfstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugzeugmuster [64]

Flugzeugmuster	Material Skin / Stringer
B707	2024-T3/7075-T6
B727	2024-T3/7075-T6
B737	2024-T3/7075-T6
B747	2024-T3/7075-T6
L-188	2024-T3/7075-T6
C-130	2024-T3/7075-T6
C-141	7079-T6/7075-T6
DC-8	2024-T3/7075-T6
DC-9	2014-T3/7075-T6
DC-10	2024-T3/7075-T6

5.2.2 Flügel

Weitere wichtige Funktionen übernehmen das Tragwerk bzw. die Flügel eines Flugzeugs. Die Tragflügel, die über den Flügelmittelkasten mit dem Rumpf verbunden sind, haben folgende Aufgaben:

- Auftriebserzeugung
 - Befestigung und Unterbringung der Steuerflächen zur Steuerung des Flugzeugs
 - Kraftstoffaufnahme
 - Befestigung der Triebwerke (modellabhängig)
 - Befestigung und Unterbringung des Hauptfahrwerks (modellabhängig)
- [41]

In der folgenden Abbildung 27 ist eine Aufteilung des Flügels in Rippen ersichtlich. Es gibt keine Einteilung nach Stringern und Spanten, wie beim Rumpf.

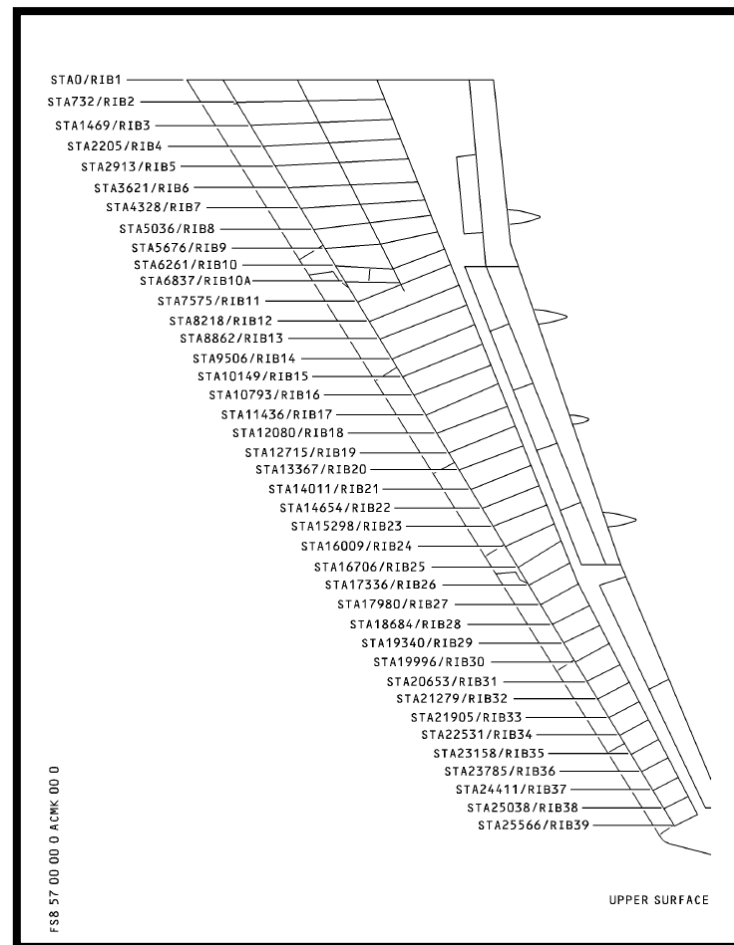


Abbildung 27: Rippenstruktur eines Flügels für einen Airbus A340 [65]

Beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Flügelbereich:

Tabelle 10 zeigt beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Bereich der Flügel anhand von ausgewählten Flugzeugmustern. Die verwendeten Legierungen, soweit bekannt, unterscheiden sich zwischen der Ober- und Unterseite eines Flügels. Des Weiteren wurde eine Einteilung zwischen Flügelhaut (Skin) und Flügelstruktur (Stringer) gemacht.

Tabelle 10: Für die Flügelstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugzeugmuster [64]

Flugzeugmuster	Flügelseite	Material Skin / Stringer
B707	Oberseite	7178/7178
	Unterseite	2024-T3777075-T6
B727	Oberseite	7178-T651/7178-T6511
	Unterseite	2024-T351/2024-T3511
B737	Oberseite	7178-T651/ -
	Unterseite	2024-T351
B757 und 767	Oberseite	7150-T6/7150-T6
	Unterseite	2324-T3/2224-T3
B747	Oberseite	7075-T6/7075-T6
	Unterseite	2024/2024
A300	Oberseite	7075-T6/ -
	Unterseite	2024-T3/ -
L188	Oberseite	7178-T6
	Unterseite	7075-T6
C130	Oberseite	7178/7075
	Unterseite	7178/7075
C141	Oberseite	7075-T6
	Unterseite	7075-T6
DC-8	Oberseite	7075/ -
	Unterseite	7075/ -
DC-9	Oberseite	7075-T6/ -
	Unterseite	2024-T4/ -
DC-10	Oberseite	7075-T651/7075-T6
	Unterseite	2024-T351/7075-T6

5.2.3 Flügelmittelkasten (Wing center box)

Der Flügelmittelkasten verbindet die beiden Flügel eines Flugzeugs im Rumpfbereich. Im Fall des Airbus A340 befindet sich der Flügelmittelkasten zwischen den Spanten FR 40 und FR 47, siehe Abbildung 28. Der Flügelmittelkasten ist in einem Flugzeug der stabilste und widerstandsfähigste Verbund.

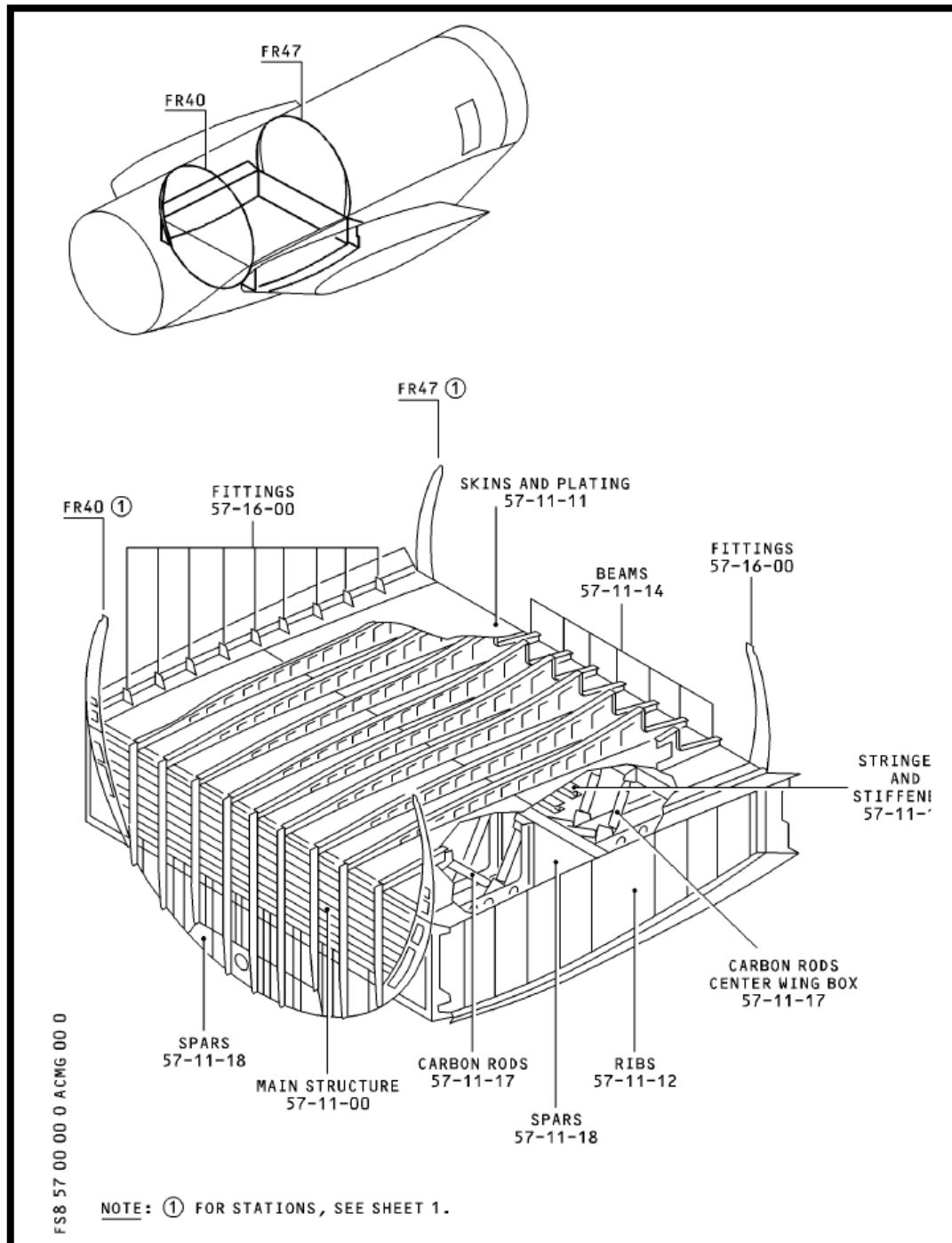


Abbildung 28: Flügelmittelkasten Airbus A340 [65]

Dieses dargestellte Bauteil gehört zur primären Struktur des Tragwerks. Es nimmt die Kräfte auf, die in die Flügelstruktur und die Rumpfstruktur eingeleitet werden, wie z. B. die am Flügel angreifenden Auftriebskräfte sowie die Schubkräfte der Triebwerke. Die Struktur des Tragwerks ist dadurch die am stärksten belastete Struktur eines Flugzeugs. Neben der Aufnahme der Lasten dient das Tragwerk gleichzeitig auch als Treibstofftank. Es wird nicht nur der Hohlraum der Flügel, sondern auch der Hohlraum des Flügelmittelkastens für die Kraftstoffaufnahme genutzt. Die hier betrachteten Flugzeugmuster halten typischerweise drei Haupttanks vor, Tank 1 im linken Flügel, Tank 2 im rechten Flügel und den Center Tank.

5.2.4 Leitwerke

Das Leitwerk umfasst das horizontal angeordnete Höhenleitwerk und das vertikal angeordnete Seitenleitwerk. Sie haben die komplexe Aufgabe, das Flugzeug in der Luft zu stabilisieren. Beide Leitwerke sind in Abbildung 29 zu erkennen. Die Hohlräume des Höhenleitwerks werden bei einigen Flugzeugmustern als Treibstofftank bzw. Trimm-tank genutzt. Seitenleitwerke der hier betrachteten Flugzeugmuster haben eine nicht zu unterschätzende Dimension. So beträgt bei einem Airbus A340 - 300 die Höhe des Seitenleitwerks 16,70 m. In Kombination mit den Tragflügelflächen, im Fall des Airbus A340 - 300 von 361,6 m² kann bei geparkten Flugzeugen eine starke Windlast auf diese Flächen wirken. Daher müssen geparkte Flugzeuge, auf freier Fläche mit Ausgleichgewichten oder durch entsprechende Betankung ausreichend gesichert werden.



Abbildung 29: Anordnung der Leitwerke am Beispiel Airbus A330 [66]

Beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Leitwerksbereich:

Die Tabelle 11 beschreibt beispielhaft verwendete Aluminiumlegierungen im Bereich der Leitwerke anhand von ausgewählten Flugzeugmustern. Die verwendeten Legierungen, soweit bekannt und veröffentlicht, unterscheiden sich zwischen Seiten- und Höhenleitwerk.

Tabelle 11: Für die Leitwerkstruktur eingesetzte Aluminium-Legierungen am Beispiel ausgewählter Flugmuster [64]

Flugzeugmuster	Leitwerk	Material Skin / Stringer
B707 / 737	Seitenleitwerk	2024-T3
	Höhenleitwerk	2024-T3
B727	Seitenleitwerk	2024-/7075-T6
	Höhenleitwerk	2024-T3
B747	Seitenleitwerk	7075-T6
	Höhenleitwerk	7075-T6
DC-10	Seitenleitwerk	7075-T6
	Horizontal	7075-T651

Zum Teil kann wiederum eine Unterscheidung zwischen Leitwerkshaut (Skin) und Leitwerkstruktur (Stringer) gemacht werden.

5.2.5 Fahrwerke

Das Fahrwerk des Flugzeugs sorgt für die erforderliche Beweglichkeit am Boden und schafft die Möglichkeit, das Flugzeug auch mit hohen Geschwindigkeiten rollen zu lassen. Weiterhin hat es die Aufgabe, Landestöße zu dämpfen. Fahrwerke von Flugzeugen können grundlegend in zwei verschiedene Arten unterteilt werden:

- Starre Fahrwerke
- Einziehfahrwerke.

Typischerweise kommen heute einziehbare Dreipunktfahrwerke zum Einsatz. Das Bugfahrwerk ist im vorderen Rumpfbereich angebracht. Die Hauptfahrwerke sind im Bereich der Flügel installiert. Durch diese Anordnung, verbunden über die starre Flugzeugstruktur, entsteht eine stabile Dreipunktstützung, wenn das Fahrwerk ausgefahren ist. Ein zusätzliches mittleres Fahrwerk (Center Gear), soweit beim betrachteten Flugzeugmuster eingebaut, ist im Bereich des Flügelmittelkastens angeordnet.

Auf Abbildung 30 ist die Dimension von zwei Boeing B747 Fahrwerken erkennbar. Anhand der Größe ist ersichtlich, dass sich diese Baugruppen nur mit größerem technischen Aufwand ausbauen und verbringen lassen. Die abgebildeten Fahrwerke wurden in der Nähe von Kuala Lumpur (Malaysia) zum Verkauf angeboten. Durch die fehlende Maschinentechnik vor Ort, konnten die Fahrwerke nicht unbrauchbar gemacht und auch nicht vorzerkleinert werden, um das Material in die stoffliche Verwertung zu bringen. Daher wurden sie vor einigen Jahren nicht umweltgerecht in einen Wald in der Nähe des Flugplatzes verbracht und werden seitdem dort gelagert.



Abbildung 30: Kritische Lagerung von Boeing B747 Fahrwerken in der Nähe von Kuala Lumpur (eigene Darstellung)

Die Fahrwerke werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter betrachtet, da sie für die Entwicklung eines Verwertungssystems für Altflugzeuge mit Schwerpunkt auf der Aufbereitung komplexer Materialverbunde zunächst nicht von Relevanz sind.

5.3 Triebwerksanlage

Der Vollständigkeit halber, aber ebenfalls für den weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht relevant, wird noch die Triebwerksanlage auf Basis der DIN 9020 Teil 2 „Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft, Massehauptgruppen und Massebegriffe Definition“ [51] mit den in ihr enthaltenen Komponenten angeführt. Siehe hierzu die Auflistung der nachfolgenden Tabelle 12.

Tabelle 12: Komponenten der Triebwerksanlage von Flugzeugen
DIN 9020 Teil 2 [51]

Komponenten	
Triebwerk oder Gasgenerator	Kraftstoffanlage
Nachbrenner	Kraftstoffreste
Hilfsgerätegetriebe- und antriebe	Wasser-Methanol-Einspritzanlage
Kühlanlage	Triebwerksbedienanlage
Reaktionsantriebsanlage	Anlaßanlage
Gasaustrittsanlage	Propelleranlage
Schmierstoffanlage	Fan-Anlage
Gesamtschmierstoff	Getriebe und Übertragungselemente

Im Triebwerksbereich fallen z. B. folgende hochwertige nickel-, rhenium- und kobalthaltige Schrotte mit einer hohen Wertschöpfung an:

Tabelle 13: Beispielhaft verwendete nickelbasis- und rheniumhaltige Superlegierung im Triebwerksbereich [67]

Legierung	Werkstoffnr.	UNS-Nummer
Alloy 718	2.4668	N07718
Alloy 713	2.4670	N07713
Waspaloy	2.4654	N07001
Alloy X	2.4665	N06002
Alloy C-263	2.4650	N07263
Alloy R-41	2.4973	N07041
Alloy 100	2.4674	N13100
Alloy PWA 1484	k. A.	k. A.
Alloy R-142	k. A.	k. A.

In der Abbildung 31 sind die verbauten Hauptmaterialien an einem Zweistrom-Zweiwellentriebwerk (Twin-shaft engine) grafisch dargestellt. Das beispielhaft beschriebene Triebwerk ist ein V2500 - A5 Triebwerk und wurde von der Firma MTU, Pratt & Whitney und Japanese Aero Engines Corporation entwickelt. Das Triebwerk wird für Kurz- und Mittelstreckenflugzeuge eingesetzt [68]. Die Zweiwellen-Strahltriebmaschine ist in folgende Bereiche untergliedert:

- Lufteinlass (Air Intake)
- Verdichter (Compression)
- Verbrennung (Combustion)
- Abgasanlage (Exhaust).

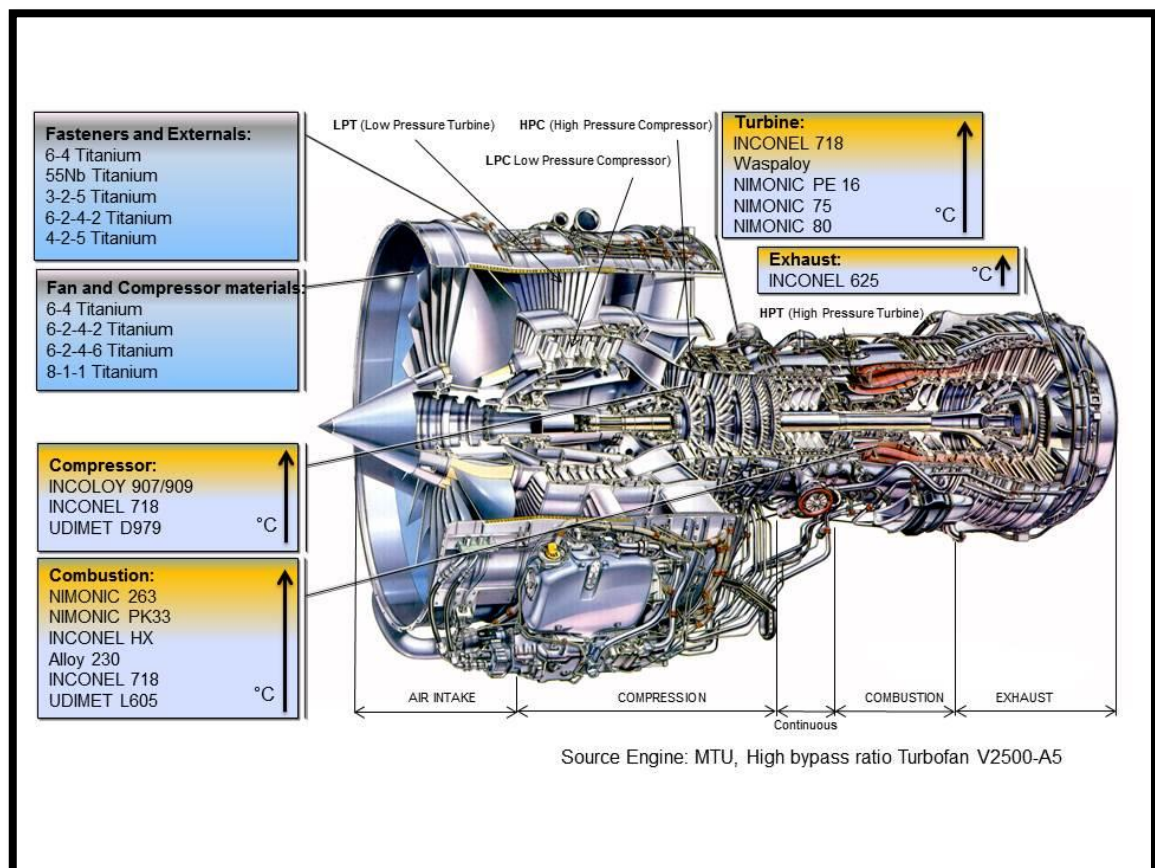


Abbildung 31: Beispielhaft verwendete Werkstoffe in einem Zweistrom-Zweiwellentriebwerk [69]

Im Lufteinlass, Niederdruckverdichterbereich (LPC) und dem Niederdruckturbinenbereich (LPT) werden hauptsächlich verschiedene Titanlegierungen verbaut. Im Hochdruckverdichterbereich (HPC), Hochdruckturbinenbereich (HPT) und im Abgasbereich werden verschiedene Superlegierungen

verbaut. Die verwendeten Superlegierungen sind auf Hochtemperaturanwendungen ausgelegt.

5.4 Ausrüstung

Zu der Ausrüstung eines Flugzeugs gehört gemäß DIN 9020 Teil 2 neben der Standardausrüstung die Sonderausrüstung sowie die bewegliche Einsatz-ausrüstung. Die Standardausrüstung wird auf Basis der geltenden Bauvorschriften und der technischen Notwendigkeit inkludiert. Die Sonderausrüstung wird vom Hersteller zur Erfüllung der Kundenwünsche eingebaut. Tabelle 14 gibt einen groben Überblick über die Standardausrüstung.

Tabelle 14: Standardausrüstung von Flugzeugen DIN 9020 Teil 2 [51]

Komponenten	
Steuerungsanlage	Elektronische Anlage
Hilfstriebwerksanlage (APU)	Ausstattung und Einrichtung
Instrumentenanlage	Integriertes Absetz- und Ladesystem
Hydraulische und Pneumatische Anlage	Klimaanlage
Elektrische Anlage	Enteisungsanlage
Bewaffnungsanlage	Hilfsausrüstung

5.5 Bauteilkennzeichnung über Partnummern

In einem Flugzeug ist jedem Bauteil eine Partnummer zugeordnet. Das ermöglicht die eindeutige Identifizierung und Lokalisierung von Komponenten und Baugruppen in einem Flugzeug sowie in den jeweiligen Handbüchern (AMM, IPC, SRM usw.) der Flugzeugdokumentation. Ein Beispiel für die Systematik der Definition von Partnummern, die der Hersteller Airbus nutzt, ist in Abbildung 32 dargestellt.

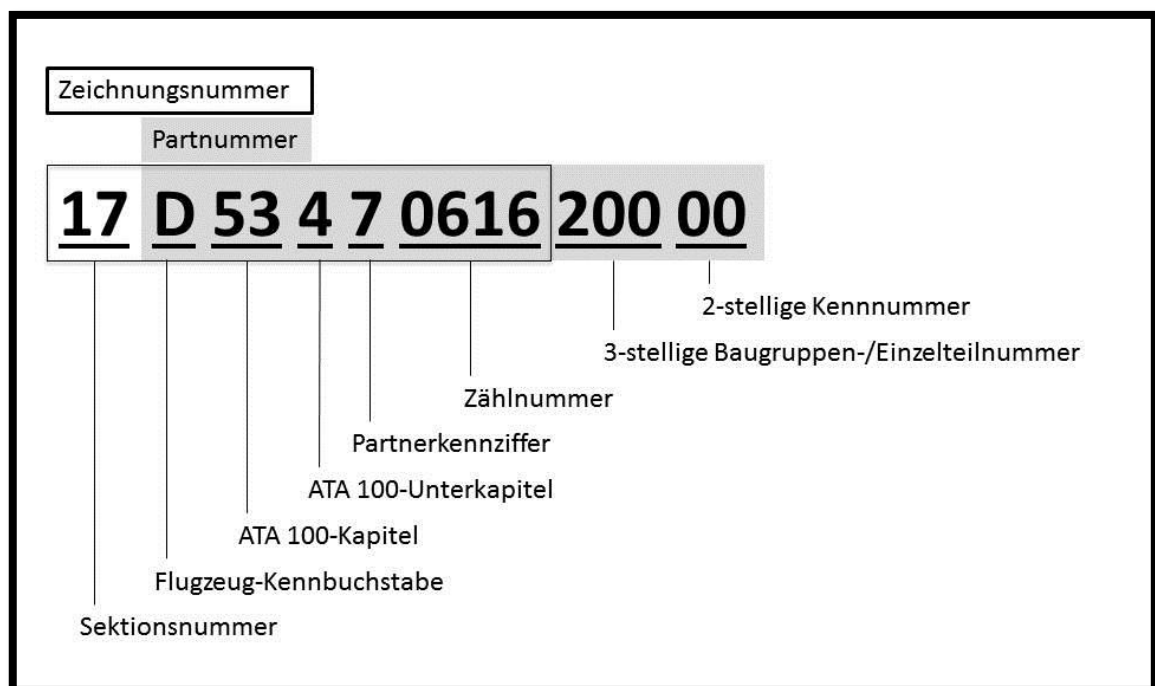


Abbildung 32: Systematik zur Definition von Partnummern des Flugzeugherstellers Airbus [70]

Sie entspricht folgender Logik:

Partnummer

Die Partnummer setzt sich aus der gekürzten Zeichnungsnummer zuzüglich der dreistelligen Baugruppen- oder Einzelteilkennnummer sowie einer zweistelligen Kennzahl (Suffix) zusammen.

Sektionsnummer

Die Sektionsnummer kennzeichnet die Position am Flugzeug. Die sektionsübergreifenden Bauteile werden mit einer 10 gekennzeichnet. Die Aufteilung ist dem jeweiligen ATA-Übersichtsplan zu entnehmen.

Flugzeug-Kennbuchstabe

Die Airbustyp-Kennbuchstaben sind nachfolgend festgelegt:

- „A“ gilt für A300, A300-600 und A310
- „B“ gilt für A 300-600 und A310 und für die Fälle, wenn die Zeichnungsnummer unter A vergeben ist
- „D“ gilt für A318, A319, A320 und A321
- „F“ gilt für A330 und A340
- „K“ gilt für A300-600 ST (Beluga)
- „R“ gilt für Reparatur-Zeichnungen aller Airbus-Baumuster

ATA 100-Kapitel

Die ATA-Hauptkapitelnummer definiert den Konstruktionsbereich, dem die Bauunterlagen nach ATA-Plan zugeordnet sind.

ATA 100-Unterkapitel

Die ATA 100-Unterkapitelnummer bildet eine feinere Untergliederung des ATA 100-Hauptkapitels, die den konstruktiven Abschnitt enger bezeichnet.

Partnerkennziffer

Die Ziffer zeigt die Verantwortlichkeit der Partner anhand eines Übersichtsplans.

Zählnummer

Das System vergibt automatisch eine Zählnummer.

Dreistellige Baugruppen-/ Einzelteilnummer

Die dreistellige Kennnummer ist nach Bau- und Lose-Teilgruppe, Einzelteile, Teile des Kundendienstes sowie der Fertigung unterteilt.

Tabelle 15: Beschreibung der dreistelligen Baugruppen

Kennnummer		
000 - 149	Baugruppe (Variante)	000 - 149
150 - 199	Lose-Teilegruppe	150 - 199
200 - 899	Einzelteil (part)	200 - 899
900 - 949	Reserviert für	Kundendienst
950 - 999		Fertigung

Gerade Endzahl: Gezeichnete Baugruppen/Einzelteile

Ungerade Endzahl: Spiegelbildteile

Gerade Endzahl: Einbauort des Einzelteils in Flugzeug LH (linke Seite)

Ungerade Endzahl: Einbauort des Einzelteils in Flugzeug RH (rechte Seite)

Zweistellige Kennnummer

Die zweistellige Kennnummer gibt den Bauzustand von Serien- und Ersatzteilen an.

Nachdem die Grundlagen in Kapitel 3, 4 und 5 dargelegt wurden, soll im nachfolgenden Kapitel 6 nun näher auf die im Flugzeugbau verwendeten Materialien und Materialverbunde eingegangen werden.

6 Eingesetzte Materialien im Flugzeugbau

Eine detaillierte Kenntnis der im Flugzeug verbauten Materialien ist für eine optimale stoffliche Verwertung maßgebend. Hierfür soll im folgenden Kapitel ein Überblick über die verwendeten Materialien und die eventuell beim Rückbau auftretenden Gefahr- und Schadstoffe geschaffen werden.

6.1 Überblick über verwendete Werkstoffe

In der Luftfahrt wird eine Vielzahl an Werkstoffen verwendet. Grundsätzlich können diese in metallische und nichtmetallische Werkstoffe unterteilt werden.

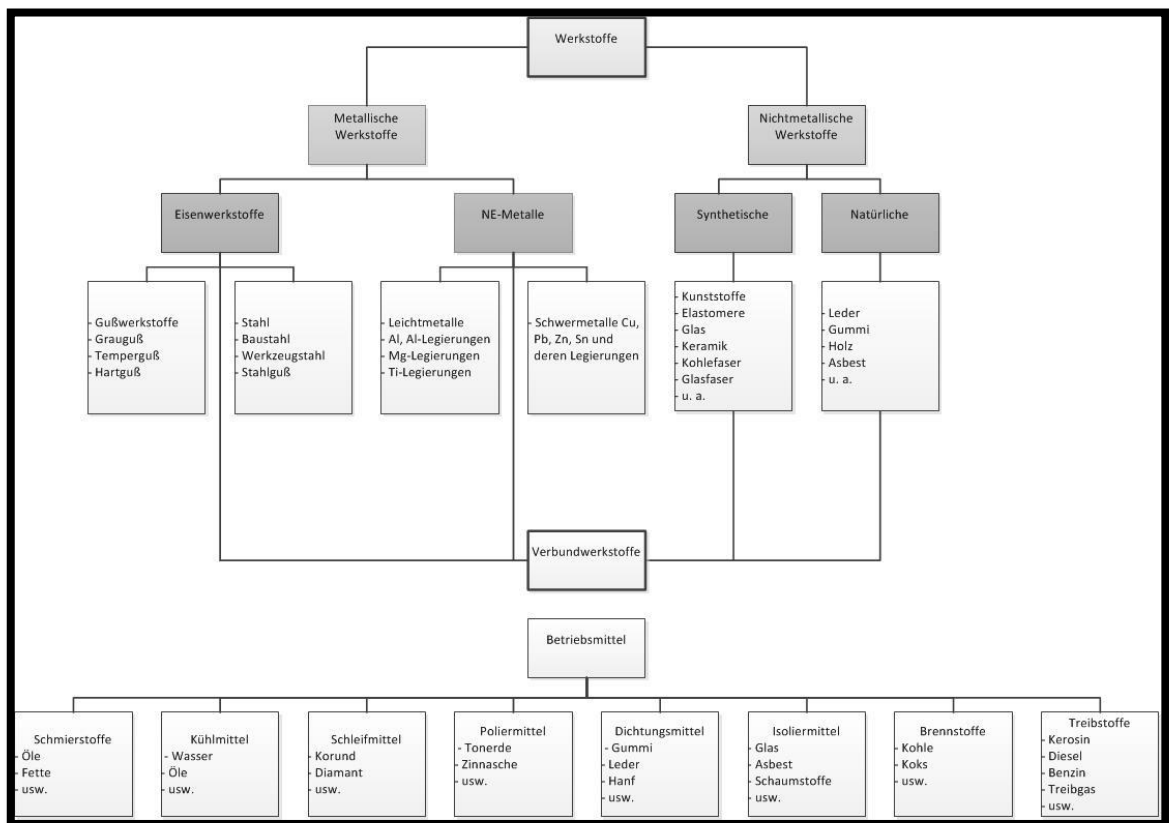


Abbildung 33: Einteilung von Werkstoffen und Betriebsmitteln im Flugzeugbau, vgl. [41]

Die metallischen Werkstoffe können aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Eigenschaften in Eisen- und Nichteisenwerkstoffe unterteilt werden. Die nichtmetallischen Werkstoffe können in natürlich vorkommende und in synthetisch hergestellte Werkstoffe unterschieden werden. Auch eine systematische Unterteilung der verschiedenen eingesetzten Betriebsmittel ist möglich, siehe Abbildung 33.

6.2 Verbindungs- und Fügetechniken

Die verschiedenen Materialien werden in der Luftfahrt über diverse Verbindungstechniken zusammengefügt. Diese Verbindungs- und Fügetechniken sind z. B.:

- Verbindungstechniken
 - o Verschrauben
 - o Vernieten
- Fügen durch Urformen, Umformen, Schweißen und Löten
- Schrumpfen
- Kleben.

Durch die angewendeten Verbund- und Fügetechniken entsteht in einem Flugzeug ein Multimaterialverbund der verwendeten Materialien. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die, gemessen an der Masse, überwiegend eingesetzten Massenerzeugnisse in einem Flugzeug geben. Hintergrund ist die Darstellung der verwendeten Materialien, um mögliche Detektionsmöglichkeiten, Trenntechniken und Recyclingrouten abbilden zu können. Der Schwerpunkt liegt in dieser Arbeit auf den verwendeten Aluminiumlegierungen.

6.3 Aluminiumlegierungen

Unlegiertes Hüttenaluminium besitzt einen Reinheitsgrad von 99,0 - 99,9 %. Um die Materialeigenschaft zu verbessern, werden bestimmte Legierungselemente hinzugesetzt. Grundsätzlich kann eine Unterteilung der Aluminiumsorten für die Primärindustrie in Guss- und Knetlegierungen gemacht werden. Die Bezeichnung wurde auf Grundlage der, DIN EN 573, Aluminium und Aluminiumlegierungen, chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug, skizziert. Die numerische Bezeichnung erfolgt auf Grundlage der DIN EN 573 - 1, Numerisches Bezeichnungssystem [71].

Normbezeichnung EN AW - 1234 X 4 Ziffern + Buchstabe für nationale Variante

A für Aluminium

W für Erzeugnisform Knetlegierung oder

C für Erzeugnisform Gusslegierung

1 Hauptlegierungselement

2 Legierungsabwandlungen

3,4 Zählziffern

Eine weitere Möglichkeit ist die Bezeichnung mit chemischen Symbolen auf Grundlage der DIN EN 573 - 2, die Darstellung erfolgt über das numerische Bezeichnungssystem. In Abbildung 34 sind Guss- sowie Knetlegierungen abgebildet [72]. Diese Legierungen enthalten oftmals verschiedene Legierungselemente, um eine optimale Stoffeigenschaft zu erzeugen. Zusätzlich sind die Knetlegierungen in naturharte Legierungen und aushärtbare Legierungen unterteilt. Die Legierungen können auch noch einer Wärmebehandlung (für eine unterschiedliche Mischkristallbildung zur Verbesserung der mechanischen Kennwerte) unterzogen werden.

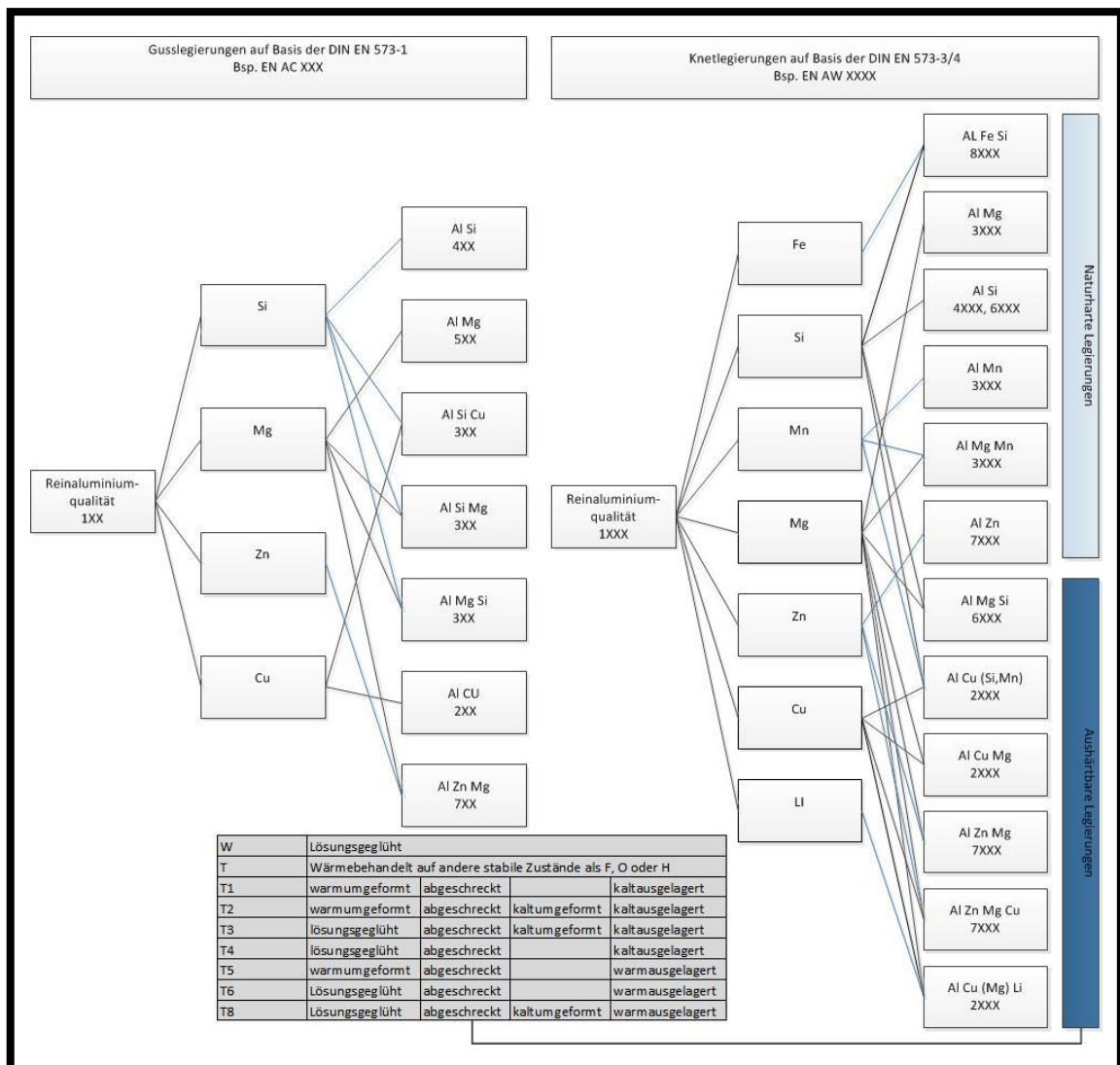


Abbildung 34: Schematischer Aufbau der verschiedenen Aluminiumlegierungen [73]

Im Flugzeugbau werden Aluminiumlegierungen aus dem Bereich der 1XXX-, 2XXX-, 5XXX- und 7XXX- Legierungen verwendet. Diese werden für ihren spezifischen Einsatz einer definierten Wärmebehandlung unterzogen. Mögliche Wärmebehandlungsverfahren für Aluminium sind:

- Weichglühen
- Entspannungsglühen
- Rekristallisationsglühen
- Homogenisierungsglühen
- Aushärten

Die beschriebenen Aluminiumlegierungen werden im Anhang B vorgestellt [74]. Bei Flügel und Rumpf kommen in erster Linie zwei Legierungsgruppen zum Einsatz. Der Rumpf besteht größtenteils aus einer 2XXX-Legierung (Al-Cu) mit Legierungsbestandteilen von Cu, Mg, Mn und Si. Für diese Legierungsgruppe wurde auch der Begriff Duraluminium (2000 - 2999 Al-Legierungsgruppe) geprägt. Die Flügel bestehen demgegenüber aus einer 7XXX-Legierung (Al-Zn-Mg) mit hohen Legierungsbestandteilen von Zn, Cu und Mg. In Tabelle 16 sind beispielhaft Al-Legierungen aufgezeigt, die in der Luftfahrt verwendet werden. Eine ältere Legierung aus dem Bereich der 2XXX-Serie ist zum Beispiel die viel verwendete 2024-Legierung. Im Bereich der 7XXX-Serie ist es die 7075. Neue Flugzeuge werden mit hochreinen Legierungen, wie z. B. die 2124, 2324, 7050, 7175 und 7475-Legierungen, gebaut, vgl. [75]. Gegenüber den 2XXX-Legierungen haben die 7XXX-Legierungen den Vorteil einer höheren Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Ihr Nachteil ist eine höhere Rissfortschrittsgeschwindigkeit und schnellere Ermüdung des Materials.

Tabelle 16: Beispielhaft verwendete Al-Legierungen im Flugzeugbau auf Basis prozentualer Anteile [75]

Legierung	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
2014	≈ 93	4,4	0,7 max.	0,50	0,8	0,8	0,15 max.
2214	≈ 93	4,4	0,3 max.	0,50	0,8	0,8	0,15 max.
2024	≈ 93	4,4	0,5 max.	1,5	0,6	0,5 max.	0,25 max.
2324	≈ 94	4,1	0,12 max.	1,5	0,6	0,1 max.	0,15 max.
7050	≈ 89	2,3	0,15 max.	2,2	0,1 max.	0,12 max.	6,2
7075	≈ 90	1,6	0,5 max.	2,5	0,3 max.	0,4 max.	5,6
7475	≈ 90	1,6	0,12 max.	2,2	0,06 max.	0,1 max.	5,7
7178	≈ 89	2,0	0,5 max.	2,8	0,3 max.	0,4 max.	6,8

Das in der Luftfahrt verwendete kupferlegierte Aluminium ist durch die signifikant unterschiedlichen Legierungsbestandteile in der elektrochemischen Spannungsreihe korrosionsgefährdet. Daher wird eine solche Legierung in der Luftfahrt z. T. mit einem Reinaluminiumblech plattiert, z. B. über Kaltwalzplattierung oder Walzschweißplattierung. Wenn Aluminiumbleche im amerikanischen Normsystem plattiert sind, wird vor die Bezeichnung des Werkstoffs ein „CLAD“ gesetzt.

6.4 Weiterentwicklung von Aluminiumlegierungen

Die dargestellte Tabelle 16 zeigt den momentanen Ist-Stand der verwertbaren Aluminiumlegierungen aus dem Altflugzeugbereich. Durch die Weiterentwicklung der Legierungen können in Zukunft z. B. immer mehr Aluminium-Lithium-Legierungen im Luftfahrtbereich eingesetzt werden. Das Legierungselement Lithium (Li) hat den Vorteil, das spezifische Gewicht zu verringern. Bei jedem eingesetzten Masseprozent Li senkt sich die Dichte der Al-Legierung um bis zu 3 %. Damit lässt sich die Dichte insgesamt um bis zu 15 % bei maximaler Zulegierung verringern. Weiterhin kann dabei das Elastizitätsmodul um bis zu 15 % erhöht werden. Der Zusatz, Li findet sich beispielhaft in folgenden Legierungsgruppen wieder: 2XXX und 8XXX Al-Legierungen, vgl. Tabelle 17. Auf Grund der hohen Oxidationsneigung und Brandgefahr von Li durch starke exotherme Reaktionen müssen besondere Schutzvorrichtungen in der Al-Gießerei zur Herstellung dieses Werkstoffes zur Verfügung stehen, z. B. Vakuumverfahren. Daher ist die Herstellung dieser Legierung wesentlich aufwendiger und teurer.

Tabelle 17: Beispielhafte Al-Li Legierungen im Flugzeugbau [76]

Legierung	Al	Cu	Li	Ag	Mg	Zr
Weldalite 049	≈ 92	5,4	1,3	0,4	0,4	0,14
Alloy 2090	≈ 95	2,7	2,2	-	-	0,12
Alloy 2091	≈ 96	2,1	2,0	-	-	0,10
Alloy 8090	≈ 95	1,3	2,45	-	0,95	0,12

Eine weitere neue Legierungsvariante durch den Zusatz von Scandium, die 15 % Gewichtsersparnis verspricht, soll nach Aussage des Gesamtverbandes der Aluminiumindustrie e. V. von der Firma Aleris Aluminium für die Luftfahrt auf den Markt gebracht werden [77]. Weiterhin hat die EADS Deutschland GmbH eine europäische Patentschrift für eine Al-Mg-Si-Aluminium-Gusslegierung mit Scandium mit der Patentnummer EP 1 682 688 B1 angemeldet. Der Werkstoff ist für thermisch hochbelastete Gussteile (thermische Stabilität bis 400°C) geeignet und belegt den Trend neuer eingesetzter Legierungsbestandteile im Leichtbausektor der Luftfahrt. Derzeit stehen keine pyrometallurgischen Verfahren zum Trennen von verschiedenen Al-Legierungen zur Verfügung. Das ist der Tatsache geschuldet, dass die eingesetzten Legierungsbestandteile in den Al-Legierungen meist edler sind als das verwendete Aluminium. Diese lassen sich nicht auf pyrometallurgischem Wege aus den Legierungen austreiben. Alternativ wären höchstens Möglichkeiten der Trennung im Bereich der elektrochemischen Trennung nach vorbereitenden Maßnahmen denkbar. Aufgrund des beschriebenen Trends, dass die Luftfahrtlegierungen immer komplexer werden und dass die Legierungsbestandteile immer wertvoller sind, lohnt sich mittelfristig der Ausblick in neue Sortiervverfahren. Diese Verfahren unterstützen die konventionelle mechanische Aufbereitung nach dem Materialaufschluss und verwenden neue Verfahrensschritte, wie z. B. die sensorgestützte Sortierung.

6.5 Stahllegierungen

Weltweit kommen unterschiedliche Systematiken zur Beschreibung von Stahlarten zum Einsatz. In Deutschland gibt es sog. Werkstoffnummern (W. - Nr.), in Amerika wird die American Iron and Steel Institute number (AISI) verwendet und in Japan gibt es die Japanese Industrial Standards number (JIS). In Deutschland ist auch eine Bezeichnung nach DIN 17600 [78] geläufig. Über diese Kennzeichnung lassen sich Stähle in verschiedene Qualitäten und Einsatzbereiche einteilen.

Durch eine Wärmebehandlung eines fertigen Stahlprodukts kann der Gitteraufbau noch gezielt verändert werden. Zu diesen Wärmebehandlungen zählen das Spannungsarmglühen, Weichglühen, Normalglühen bzw. Anlassen und das

Vergüten. Im Flugzeugbau kommen Stähle typischerweise im Fahrwerksbereich zum Einsatz. Hierbei handelt es sich überwiegend um die Stahlsorten 4130, 4340, 4330V und 300M, Tabelle 18 gibt einen Überblick.

Tabelle 18: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Stahlsorten (Stahllegierungen) [64]

Material	Verwendung im Fahrwerk von Flugzeugmodellen
4340	B 707, Dc-8, C-141, L-1011
300M	B 720, B 727, B 737, B 747, C-5A, DC-10
D6AC	F-111
H11	B-70
35NCD16	Mirage, F-101, Concorde, A300
Maraging	Harrier, Super VC 10
Hy-Tuf	DC-9

6.6 Titanlegierungen

Titanwerkstoffe werden im Flugzeugbau für hochbelastete Komponenten eingesetzt. Das Material besitzt mehrere vorteilhafte Eigenschaften. Titan bzw. die Titanlegierungen besitzen eine hohe Zugfestigkeit, eine sehr gute Korrosionsfestigkeit, gute Warmumformungsmöglichkeiten und sind mit einer Dichte von ca. $4,50 \text{ g/cm}^3$ vergleichsweise leicht. Das Material ist sehr wärmebeständig und hält starker mechanischer Belastung, wie sie z. B. an einer Triebwerksaufhängung vorkommt, stand. Es ist aber auch ein verhältnismäßig teurer Werkstoff im Flugzeugbau. Der meistverbaute Titanlegierungswerkstoff in der Luftfahrt ist Ti6Al-4V (6 % Aluminium, 4 % Vanadium und 90 % Titan). Weitere verwendete Titanlegierungen sind in Tabelle 19 angeführt.

Tabelle 19: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Titanwerkstoffe [41]

Material	Verwendungsbereiche
Ti 99,2	Beplankung schnell fliegender Flugzeuge
TiAl5Sn2,5	Nasen, Behälter, Abgasanlagen, Verdichter, Turbine
TiCu2	Brandschott, Beplankung
TiAl6Sn2Zr4Mo2	Verdichter, Triebwerksaufhängung
TiAl6V6Sn2	Holme, Spante, Schrauben, Rotorkopf

Für die Untersuchung, ob es sich um ein Titan-Bauteil handelt, können relativ einfache Methoden zur ersten Orientierung und Meinungsbildung genutzt werden.

- Farb-Probe: silberblaugraue Färbung, wesentlich dunkler als Aluminium
- Funken-Probe: durch die Bearbeitung mit einem Trennschleifer entstehen markante leuchtend weiße Funken

Um eine detaillierte vor Ort-Analyse zu bekommen, ist z. B. der Einsatz von mobilen Röntgenfluoreszenz-Analysatoren (RFA) möglich.

6.7 Kunststoffe

Kunststoffe sind künstlich hergestellte Werkstoffe, die aus Makromolekülen aufgebaut sind. Sie entstehen u. a. durch Umwandlung von Naturprodukten wie z. B. Cellulosenitrat und Campher. Daraus wurde beispielsweise der erste Thermoplast mit dem Namen Celluloid im Jahr 1870 hergestellt. Durch Synthese aus Primärstoffen, wie Erdöl und Erdgas, können synthetische Kunststoffe (Polymere), wie Thermoplaste, Duroplaste und Elastomere, hergestellt werden. Diese Kunststoffe finden ein breites Anwendungsspektrum im Bereich der Luftfahrt, siehe Tabelle 20.

Tabelle 20: Beispielhaft in der Luftfahrt verwendete Kunststoffe [41]

Kunststoffsorte	Beispielhaftes Einsatzgebiet
Epoxidharz	Dient als Matrix (Bettungsmasse) der Faserverbundwerkstoffe und wird in der Primär- (z. B. Seiten- und Höhenleitwerk) und Sekundärstruktur angewendet.
Phenolharz (Bakelite)	Dient als Ersatz für Epoxidharz zur Kabinenausstattung, um die Federal Aviation Regulation Airworthiness Standards (FAR), FAR-Rauchgasvorschriften zu erfüllen.
Polyvinylchlorid (PVC)	Wurde in älteren Flugzeugen im Kabinenbereich verwendet. Da bei der Verbrennung giftiges Chlorgas entsteht, wurde PVC durch Polycarbonat ersetzt.
Polycarbonat (z. B. Lexan)	Wird zur Kabinenauskleidung benutzt.
Polyamid (aromatische Polyamide; Aramid, Kevlar)	Ist ein Faserwerkstoff und wird im Verbund mit Epoxidharz in der Sekundärstruktur eingesetzt.
Silikon	Ist überwiegend Dichtungsmittel (engl.: sealant).
Polymethylmethacrylat (Plexiglas)	Kommt als Fensterwerkstoff zur Anwendung.
Polysulfon	Löst Kunststoffe ab, die nicht den FAR-Rauchgasvorschriften entsprechen, z. B. Acrylnitril-Butadien-styrol (ABS), Polyvinylchlorid (PVC), Polyvinylfluorid (PVF, Tedlar)
Polyvinylfluorid (PVF, Tedlar)	Wurde im Kabinenbereich älterer Flugzeuge eingesetzt. Tedlar-Folie wird als Oberflächenschutz auf Verbund- und Metallbauteilen verwendet.

Der Interieur-Bereich eines kommerziellen Flugzeugs besteht mittlerweile bis zu 90 % aus Kunststoff-Verbundstoffen. In Tabelle 21 ist beispielhaft eine Massenzusammensetzung von verwendeten Kunststoffen, bezogen auf die Gewichtsanteile eines Flugzeugs, dargestellt.

Tabelle 21: In der Kabinenausrüstung eines Flugzeugs verwendete Kunststoffbauteile [79]

Kabinenausrüstung	Gewichtsanteil pro Flugzeug [kg]	Kabinenausrüstung	Gewichtsanteil pro Flugzeug [kg]
Schallschutz	100-400	Farbe	5
Decken	20-250	Passagierversorgungsmodule	250-350
Frachtraumverkleidung	>50	Trenn- und Seitenwände	100-1.000
Teppiche	100-400	Kopfkissen	5-70
Decke	600	Thermoplastische Bauteile	Ca. 250
Vorhänge	0-100	Sicherheitsgurte	5-160
Leitungssysteme	450	Sitzkissen	175-900
Elastomere	250	Sitzpolster	80-430
Notrutschen	25-500	Sitzverkleidung	40-200
Bodenplatten	70-450	Wandverkleidung	Ca. 50
Bodenbelag	10-100	Fenster	200-350
Rettungsinsel	160-530	Jalousie	100
Rettungswesten	50-250	Kabelisolierung	150-200
Gesamtsumme 3.300-8.400 kg			

In Abbildung 35 ist der Kabinenaufbau, in unterschiedlichen Ebenen von innen nach außen, exemplarisch für eine Boeing B747 dargestellt. Im linken Bildabschnitt sind die Kabinenverkleidung, z. B. aus einem Polycarbonat, und die darüber liegende Gepäckablage (Stowage) dargestellt. Der mittlere Bereich der Abbildung zeigt die Isoliermatten (aus künstlicher Mineralfaser mit Gewebeummantelung). Sie befindet sich zwischen der Flugzeugaußenhaut und der inneren Kabinenverkleidung. Außerdem ist die Bestuhlung zu sehen, die aus einem Aluminiumgerüst, Schaumstoffpolster, z. B. aus Polyethersulfonschaum oder Ultratect®), und einem textilen Sitzbezug besteht. Im rechten Bildabschnitt sind die Sitzgestelle sowie die Spanten und Stringer mit der angeklebten Flugzeughaut zu erkennen. Die integrierten Fenster des Rumpfes bestehen aus Polymethylmethacrylat (z. B. Plexiglas®).

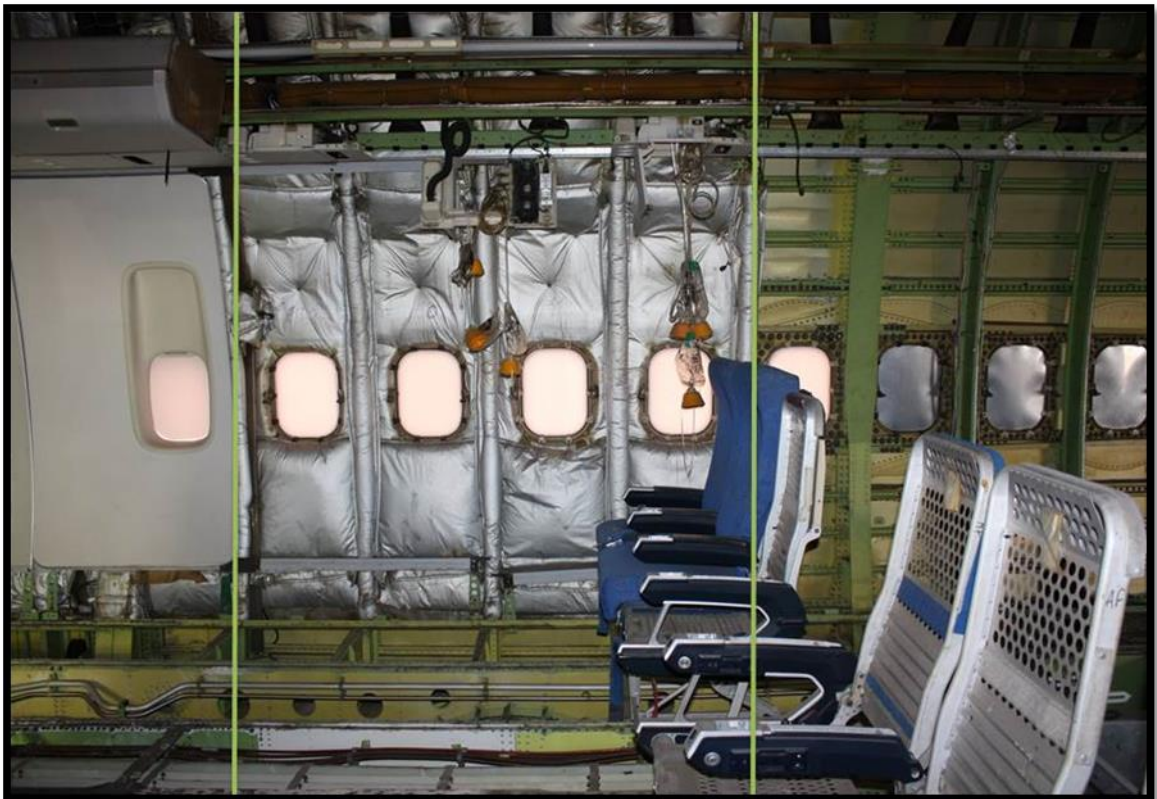


Abbildung 35: Aufbau einer Flugzeugkabine am Beispiel einer Boeing B747 (eigene Darstellung)

6.8 Verbundwerkstoffe

Bei der Flugzeugstruktur sind die Gewichtsoptimierungspotenziale unter Nutzung konventioneller NE-Legierungen nahezu ausgeschöpft. Bei der Auslegung

der Struktur moderner Flugzeugmuster kommen daher vermehrt Faser-verbundwerkstoffe zum Einsatz. Dies können z. B. kohlefaserverstärkte Kunststoffe (CFK/CFRP), glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK/GFRP) oder aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK/AFRP) sein. Aufgrund der besseren Festigkeitseigenschaften (z. B. Formsteifigkeit, E-Modul und Bruchlast) der eingesetzten Fasermaterialien, bei deutlich niedrigerem spezifischem Gewicht, können leichtere Konstruktionen realisiert werden.

In Abbildung 36 ist ein Querrudervergleich der Firma Lockheed dargestellt. Auf der linken Seite (a) Aluminium ist das Querruder in konventioneller Bauweise dargestellt. Auf der rechten Seite (b) Composite ist das Querruder unter Verwendung von Verbundwerkstoffen dargestellt. Die Anzahl der Bauteile halbiert sich nahezu. Die Gewichtersparnis beträgt ca. 26 %, siehe tabellarische Gegenüberstellung. Dieses Beispiel zeigt darüber hinaus die Vielfalt der Werkstoffzusammensetzung bei einer vergleichsweise einfachen Baugruppe unter Einsatz von Verbundwerkstoffen.

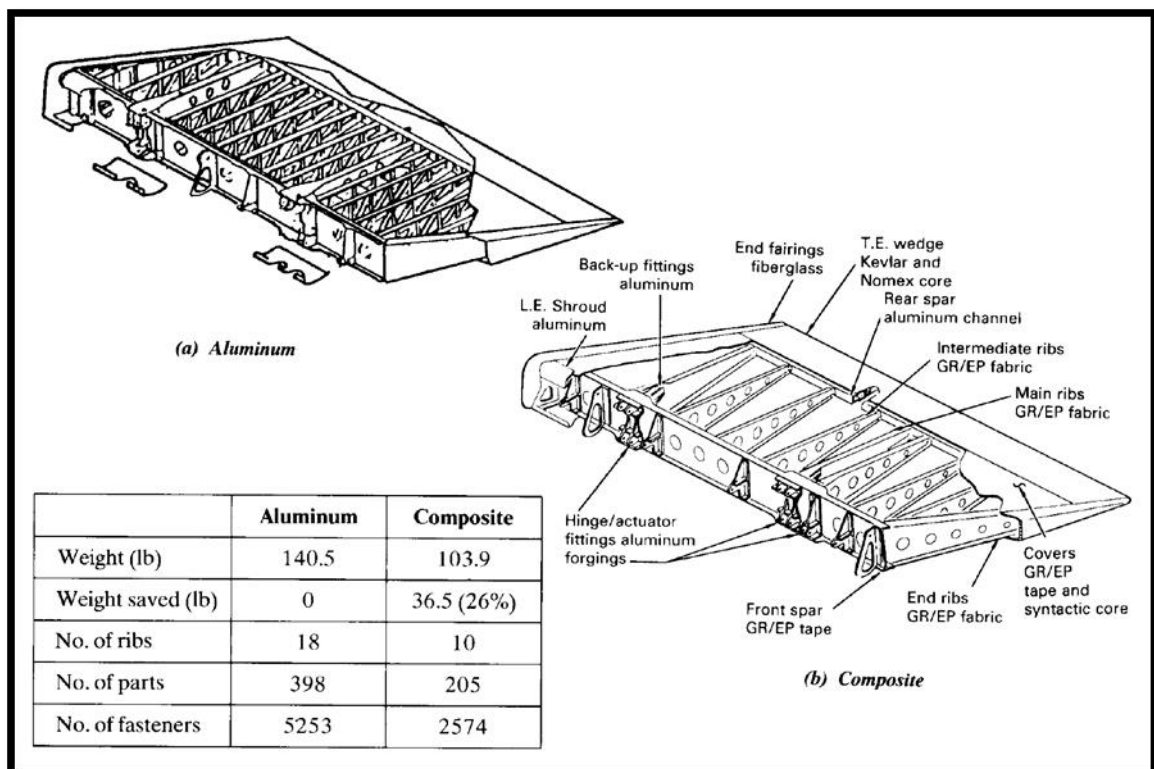


Abbildung 36: Vergleich des Aufbaus einer Querruderstruktur am Beispiel der Lockheed L-1011 TriStar [64]

Ein erster Ansatz, um Hinweise auf Einbauorte von Faserverbundwerkstoffen in einem Flugzeug zu erhalten, ist z. B. das sog. Aircraft Recovery Manual (ARM).

Dieses Handbuch beschreibt den Umgang mit havarierten Flugzeugen. Für den Fall, dass die Flugzeuge mit einem Kran geborgen werden müssen, sind die Anschlagpunkte und die Materialstrukturen von verschiedenen Baugruppen angegeben. Abbildung 37 gibt einen Überblick über die Flugzeugbereiche, in denen Verbundwerkstoffe eingesetzt sind, hier am Beispiel eines Airbus A340-200/-300.

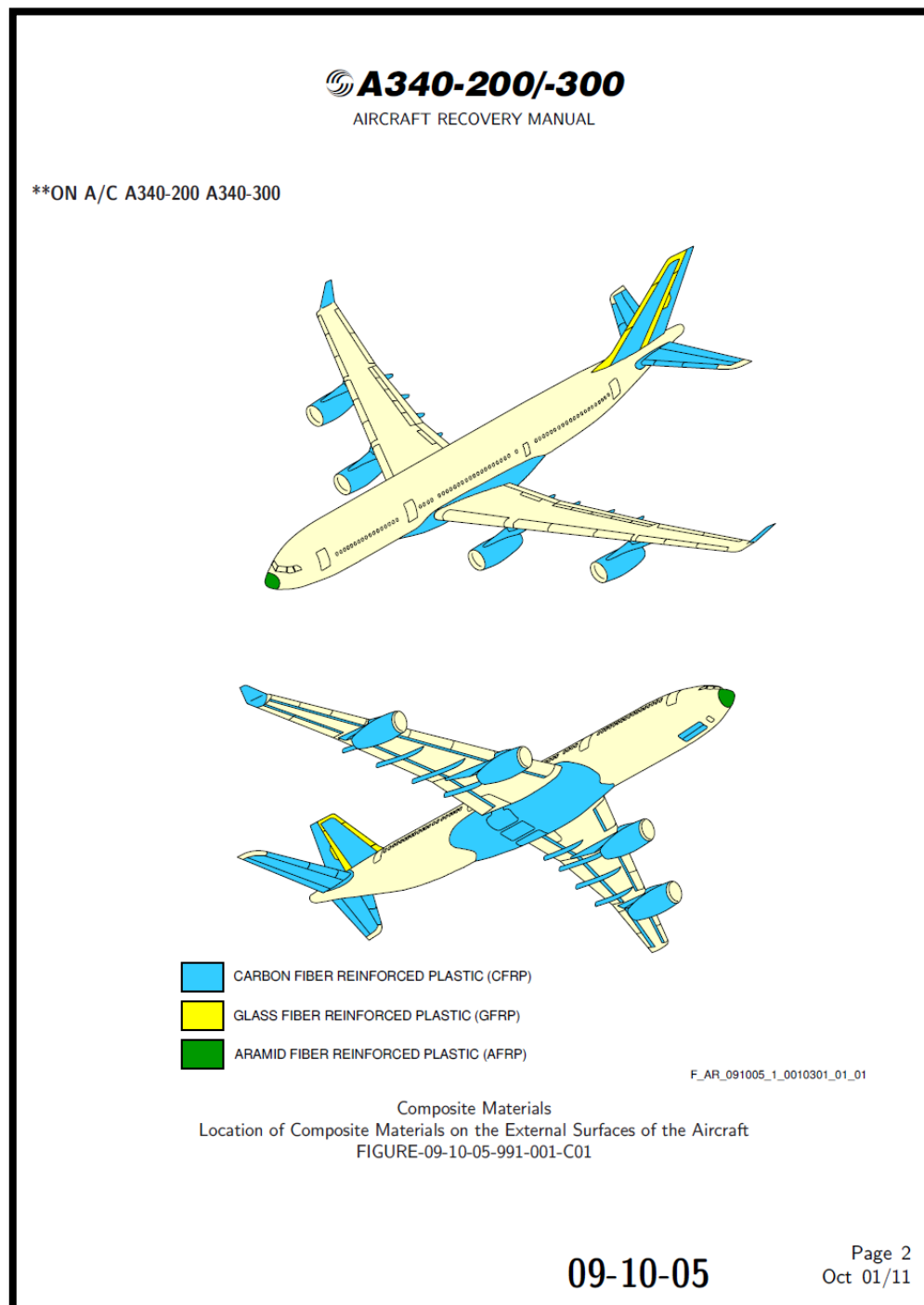


Abbildung 37: Bereiche des Flugzeugs aus Verbundwerkstoffen nach ARM am Beispiel des Airbus A340-200/-300 [80]

Eine weitere Klasse der im Flugzeugbau eingesetzten Verbundwerkstoffe stellen die Sandwichmaterialien dar. Dieses Material besteht aus mehreren verbundenen Schichten unterschiedlicher Werkstoffe. Die Deckschichten können z. B. aus metallfaserverstärktem Kunststoff oder Hartpapier bestehen. Als Werkstoff für die dazwischenliegende Wabenstruktur können u. a. Papier, Balsaholz, Kunststoffschäume, faserverstärkte Kunststoffe, Aluminium verwendet werden. In Abbildung 38 ist beispielhaft eine Triebwerksverkleidung aus Sandwichmaterial dargestellt. Hier handelt es sich um eine Honeycomb-Struktur mit einem Kern aus Aluminiumwaben und einer Deckschicht aus Aluminium. Zusätzlich kommt eine Kunststoff-/Harz-Zwischenschicht und in den Randbereichen bauteilstabilisierender Schaumstoff zum Einsatz. Das Funktionsprinzip einer Honeycombs-Struktur beruht auf dem Prinzip eines Doppel-T-Trägers. Durch den wabenförmigen Aufbau des Materials und den Schutz der Deckschichten kann eine hohe Biegefestigkeit bei geringem Materialeinsatz erreicht werden.



Abbildung 38: Triebwerksverkleidung aus einem Aluminium-Sandwichmaterial
[9]

Zwischen Flugzeugkabine und darunter liegendem Frachtraum befindet sich der Kabinenfußboden. Dieser besteht aus einer Aluminiumstruktur und darin integrierten Fußbodenpaneelen. Die Fußbodenpaneele sind aus Sandwichmaterial, bestehend aus Kunststoff mit einem Wabenkern aus phenolharzgetränktem Papier. Je nach Bauart können die Sandwichpaneele auch Aramidgewebe wie Nomex- oder Kevlar-Papier enthalten. Die Deckschichten bestehen typischerweise aus einem CFK-Prepreg (preimpregnated fibres – vorimprägnierte Fasern), die mit dem Wabenkern unter Druck über mehrere Stunden in einem Autoklaven ausgehärtet werden, vgl. [81]. In Abbildung 39 ist die Fußbodenstruktur mit teilweise ausgebauten Fußbodenpaneelen dargestellt.



Abbildung 39: Fußbodenstruktur und freigelegte Kabine eines Airbus A340 (eigene Darstellung)

Ein weiterer im Flugzeugbau relevanter Verbundwerkstoff ist glasfaserverstärktes Aluminium, GLARE (Glass-fibre reinforced Aluminium). Für die Herstellung von GLARE werden unter Druck abwechselnd Schichten von Aluminiumlegierungen (z. B. AlCuMg₂) und Glasfaserlaminat miteinander verklebt. Der Werkstoff hat, wie andere Verbundwerkstoffe, den Vorteil, dass durch die

Wahl des Materialaufbaus die strukturellen Eigenschaften eines Bauteils gezielt gesteuert werden können. Auf diese Weise ist eine Optimierung von Strukturbauteilen möglich. Das Material wurde erstmals großflächig im Airbus A380 eingesetzt. Für die Verbindung von Bauteilen aus GLARE werden typischerweise Vollnieten aus dem Werkstoff 2017A T4 (D-Niete) verwendet.

Neben den bisher in Kapitel 6 dargestellten Materialien werden im Flugzeugbau auch gefährliche Materialien eingesetzt, die bei einer Verwertung als sogenannte Gefahr- und Schadstoffe einzustufen sind. Auf diese soll in Kapitel 6.9 näher eingegangen werden.

6.9 Gefahr- und Schadstoffe bei der Verwertung von Altflugzeugen

Flugzeuge werden von der Luftfahrtindustrie nach hohen Qualitätsstandards sicher und zuverlässig hergestellt. Für den sicheren Betrieb kommerziell genutzter Verkehrsflugzeuge müssen sehr zuverlässige und leistungsfähige Materialien verbaut werden. Es wird aber auch eine Vielzahl an Materialien und Flüssigkeiten eingesetzt, die außerhalb des geschlossenen Systems Flugzeug eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen können, z. B. für die Mitarbeiter der Wartungs- und Überholungsbetriebe. Diese verwendeten Materialien müssen daher als gefährlicher Abfall behandelt werden. Das sind u.a. Kraftstoffe (z. B. Kerosin oder Aviation Gasoline (AvGas)), Hydrauliköle (z. B. Skydrol) oder Betriebsstoffe anderer druckbelasteter Systeme (Gase und Flüssigkeiten), pyrotechnische Sätze (z. B. Feuerlöscher) und radioaktive Materialien (z. B. Rauchmelder). Diese Materialien müssen dementsprechend fachgerecht demontiert, trockengelegt bzw. vorbehandelt und anschließend schadlos entsorgt werden.

Zur vorbereitenden Identifizierung und Lokalisierung der gefährlichen Stoffe und Schadstoffe in Altflugzeugen sind Recherchen in den technischen Handbüchern der Hersteller erforderlich. Die wichtigsten Dokumente für eine erste Lokalisierung potenzieller Schadstoffe in Flugzeugen sind die veröffentlichten Dokumente für die Rettungskräfte. Diese werden mit unterschiedlichen Bezeichnungen geführt (siehe auch Abbildung 40):

Firma Airbus	Aircraft Rescue and Fire Fighting Chart (ARFC)
Firma Boeing	Airplane Rescue and Fire Fighting Chart (ARFC)
Firma Bombardier	Crash Crew Chart (CCC)

Diese, für eine spätere Schadstoffentfrachtung von Altflugzeugen hilfreichen Dokumentationen werden für jedes Flugzeugmuster vom jeweiligen Hersteller öffentlich zugänglich zur Verfügung gestellt. Anhand von beispielhaften Zeichnungen, wie z. B. der sog. Rettungskräftezeichnung, und kurzen Erklärungen sind darin in der Regel folgende Informationen enthalten:

- Massenangabe und äußere Dimensionen des Flugzeugs
- Verriegelungsanweisung für das Fahrwerk nach einer Bruchlandung
- Einbauort und Menge von hoch entzündlichen Materialien und Flüssigkeiten
- Massive Verbundmaterialien, die konstruktiv verbaut worden sind, z. B. Verbünde aus Titan und Kohlefaser
- Einbauposition von Notrutschen
- Anweisung zum Öffnen der Frachtraumtüren
- Lokation von Batterien und zugehöriger Schaltkonsole im Cockpit
- Lokation der Schaltkonsole für die Triebwerks- und Hilfstriebwerksfeuerlöscher
- Lokation von druckbelasteten Flüssigkeitssystemen, z. B. Hydrauliksysteme
- Lokation von druckbelasteten Gassystemen, z. B. Sauerstoff und Stickstoff [82].

Auf Basis der Rettungskräftezeichnung und der darin enthaltenen Informationen kann ein erster Ansatz für eine sichere, umweltkonforme Schadstoffentfrachtung erarbeitet werden. Sie ermöglicht darüber hinaus eine Abschätzung des zeitlichen und finanziellen Aufwands. Zusätzlich gibt die „List of radioactiv and hazardous elements“ für Flugzeugmuster des Herstellers Airbus hilfreiche Informationen zu verbauten Schadstoffen. In dieser Liste kann für das jeweilige Airbus-Flugzeugmuster auf Part-Nummern-Ebene nach potenziellen Schadstoffen gesucht werden.

Eine weitere Hilfestellung für den Umgang mit dem zu verwertenden Altflugzeug gibt das sog. „Aircraft Recovery Manual (ARM)“. Hierin ist beispielsweise die Lage von Angriffspunkten für einen Kraneinsatz mit Hebegeschirren für den potenziellen Ausbau des Fahrwerks beschrieben.

Im folgenden Kapitel 7 wird ausführlich auf die Rahmenbedingungen für den sachgemäßen Umgang mit Altflugzeugen eingegangen, um eine Entsorgung der nicht verwendbaren Materialien sicherzustellen und eine optimale stoffliche Verwertung der Materialien darzustellen.

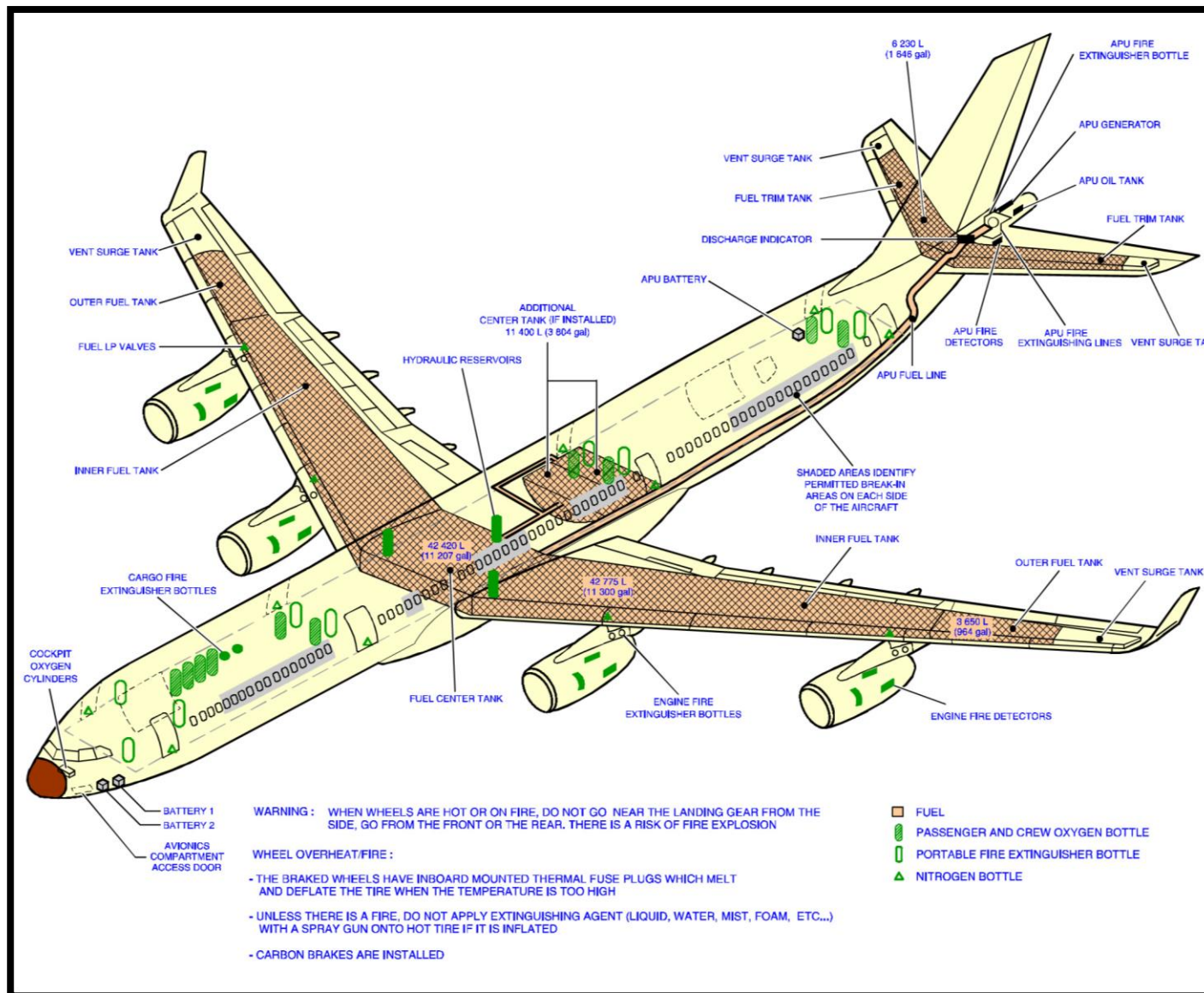


Abbildung 40: Aircraft Rescue and Fire Fighting Chart am Beispiel Airbus A340 [82]

7 Produktlebenszyklus von Flugzeugen

Der Lebenszyklus von Flugzeugen ist durch eine hohe Leistungsfähigkeit gekennzeichnet. Es handelt sich dabei um ein Zusammenspiel von Transportaufgabe mit den Kenngrößen Transportmasse und –volumen, Flugstrecke, Geschwindigkeit, Treibstoffverbrauch und ggfs. Komfort, sowie Sicherheit und Umweltfreundlichkeit. Im Rahmen dieses Kapitels wird das aktive Produktleben eines Flugzeugs (Produktlebenszyklus) beschrieben bis hin zur Entscheidung der stofflichen Verwertung und Entsorgung.

7.1 Lebenszyklus kommerzieller Transportflugzeuge am Beispiel der Airbus A320 - Familie

Kommerzielle Transportflugzeuge haben mit einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 20 - 30 Jahren einen relativ langen Lebenszyklus gegenüber beispielsweise Personenkraftfahrzeugen mit einer Nutzungsdauer von ca. 12 - 15 Jahren. In Abbildung 41 ist beispielhaft an der Airbus A320 - Familie der Produktlebenszyklus von Flugzeugen illustriert. Vom offiziellen Programmstart der Serie bis zur Außerdienststellung des letzten Flugzeugs vergehen mehr als 60 Jahre. Beispielhaft bietet die A320 - Familie von Airbus mit den Modellen A318, A319, A320 und A321 [83] über den langen Produktlebenszyklus der Modelle alle Vorteile der Kommunalität. Elementares Kennzeichen dieser Entwurfsphilosophie ist, dass relevante Systeme verschiedener Flugzeugmuster einer Familie identisch sind, mit dem Vorteil von effizienterer Herstellung und Betrieb dieser Flugzeugmuster.

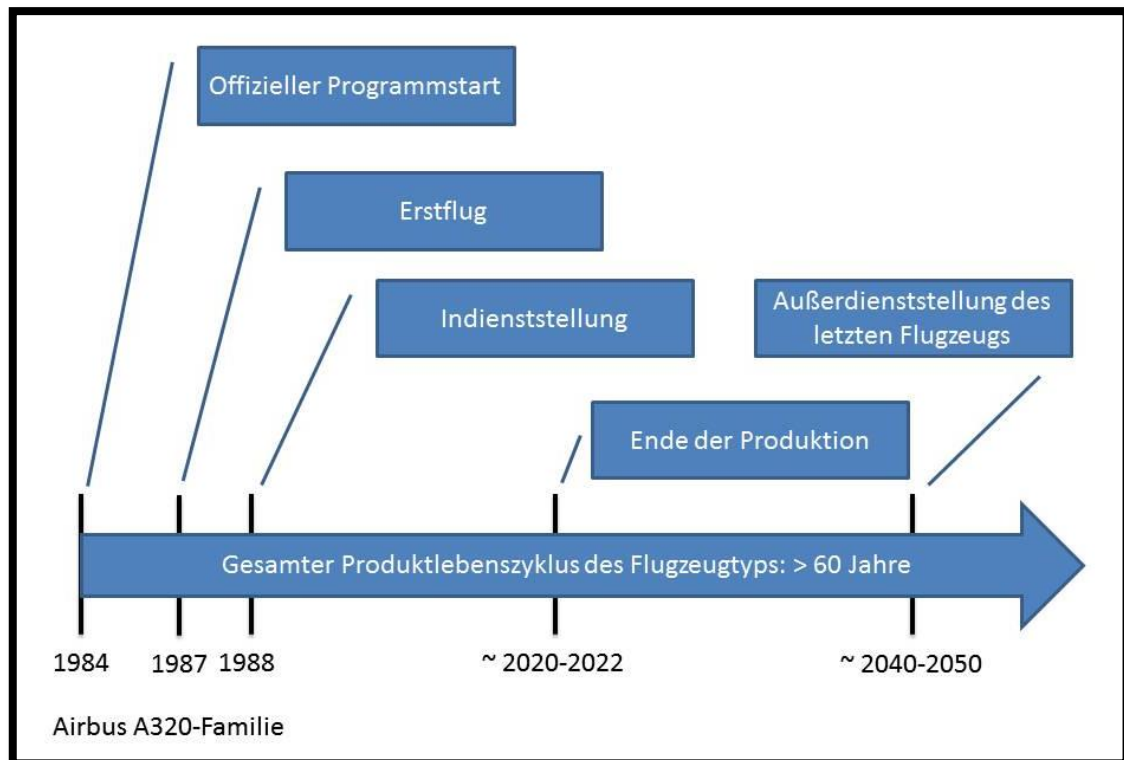


Abbildung 41: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel der Airbus A320 - Familie [14]

Bevor ein Luftfahrzeug für den Betrieb zugelassen wird und die offizielle Indienststellung antritt, muss ein Instandhaltungsprogramm herstellerseitig entwickelt und mit den jeweils zuständigen Luftfahrtbehörden abgestimmt werden. Das geschieht auf der Basis eines international abgestimmten Verfahrens mit der Bezeichnung MSG Analyse (Maintenance Steering Group 3, MSG 3). Die einzelnen Maßnahmen (sog. Maintenance Tasks) werden zu Instandhaltungsereignissen (sog. Checks), auch in Absprache mit dem Betreiber, zusammengefasst. Der Betreiber eines Flugzeugs kann dadurch die Checks auf Basis von abgeleisteten Flugstunden und Flugzyklen fast minutiös einplanen. Mit zunehmendem Alter eines Flugzeugs werden die Checks vom Arbeitsaufwand (Freilegungsarbeiten, Untersuchungen sowie Reparaturen) und der Menge an benötigtem Material und Ersatzteilen immer umfangreicher. Durch den mit dem Lebensalter des Flugzeugs steigenden Wartungsaufwand steigt auch ein signifikanter Teil der Flugzeugbetriebskosten. Im Folgenden werden die entsprechenden Checks vorgestellt.

Der Trip Check wird vor jedem Flug durchgeführt. Der D-Check ist das umfangreichste und aufwendigste Instandhaltungsereignis. Die Liegezeiten eines

IL - und eines D - Checks sind insbesondere für die Untersuchung der Flugzeug-Struktur angedacht (siehe Tabelle 22). Bei diesen Überholungsereignissen werden große Bereiche der Flugzeugstruktur für allgemeine Inspektionen und detaillierte zerstörungsfreie Materialuntersuchungen baugruppenorientiert freigelegt.

Tabelle 22: Instandhaltungsereignisse [41]

Ereignis	Intervall	Bodenzeit	Personalstunden
Trip Check	vor jedem Flug	0,5h.	0,5 h
Service Check	Wöchentlich	4 h	20 h
A - Check	250 Flug-h (4 Wochen)	6 h	40 h
B - Check	900 Flug-h (3 Monate)	12 h	150 h
C - Check (Major Check)	3.000 Flug-h (12 Monate)	30 h	700 h
IL - Check (Intermediate layover check)	Erstintervall 12.500 Flug-h (5 Jahre) Folgeintervall 6.500 Flug-h (3 Jahre)	2 Wochen	12.000 h
D - Check	Erstintervall 25.000 Flug-h (9 Jahre) Folgeintervall 12.500 Flug-h (5 Jahre)	4 Wochen	30.000 h

Im Rahmen von D - Checks können z. B. Haarrisse in tragenden Strukturbauteilen erkannt werden, die infolge harter Landungen (hard landings) entstanden sind. Wenn diese Haarrisse beispielsweise an den Tragflügeln außerhalb der festgelegten Toleranzen liegen, hätte das eine sofortige, vorübergehende Stilllegung des Luftfahrzeugs zur Folge. Als Beispiel aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Rückbauprojekten kann hier ein Airbus A300 angeführt

werden. Bei diesem Flugzeugmuster sind die Hauptfahrwerke an den Tragflügeln, in Spannweitenrichtung auf Höhe der Rippe 5 aufgehängt. An dieser Stelle findet die Kraftübertragung vom Fahrwerk in die Primärstruktur bei Start und Landung statt. Mit steigender Nutzungsdauer des Flugzeugs besteht daher die Gefahr, dass an diesem Strukturbauteil, Rippe 5, Haarrisse in der Struktur entstehen. Dieser Befund würde schlimmstenfalls zu einer endgültigen Stilllegung des Flugzeugs führen. Das Flugzeug würde nach der Gewinnung der weiter verwendbaren Hochwertteile abgemeldet und anschließend der stofflichen Verwertung übergeben werden.

7.2 Technische und wirtschaftliche Bewertung von Flugzeugen in Abhängigkeit vom Alter

Der Wert eines Flugzeugs hängt zum einen vom Zustand der Zelle ab. Zum anderen ist der Zustand der Triebwerke, der Fahrwerke, der Avionik und der Flugzeugkabine zu bewerten. Im Bereich der Zelle können beispielhaft folgende, auch irreparable, Korrosionsarten und Strukturschäden auftreten:

- Korrosion in Verbundbauteilen
- Kontaktkorrosion
(z. B. unterschiedliche elektrochemische Spannungsreihe)
- Elektrochemische Korrosion
- Spannungsrisskorrosion
- Verursachte Haarrisse durch harte Landungen und Dauervibrationen
- Verformungen, Kratzer
- Dellen, Ablösungen, Löcher.

Im Bereich von Triebwerken und Fahrwerken gibt es jeweils eine Anzahl bestimmter lebensdauerbegrenzter Bauteile, sog. Life-Limited Parts (LLP), sowie Bauteile, die je nach Zustand weiterbetrieben werden können oder einer Überholung zuzuführen sind, sog. On-Condition- or Condition-Monitored-Components (OCCM). Die LLPs unterliegen speziellen Regularien des Luftrechts. Diese Bauteile haben herstellerseitig eine definierte Laufzeit auf Basis von Betriebsstunden, Kalenderzeit und / oder Anzahl durchgeführter Starts und Landungen (sog. Cycles). Bei Erreichen des ersten lebenszeitbegrenzenden Kriteriums ist ein Austausch des Bauteils erforderlich. Eine Reparatur ist dann

nicht mehr erlaubt. Das Bauteil muss nachweislich unbrauchbar gemacht werden.

Gegenüber den LLPs, die ihr Lebenszeitende erreicht haben, können die OCCMs im Befundfall in die Werkstätten, die sog. „Shops“ eines zertifizierten 145-MRO-Betriebs, zur Überholung gehen. Diese Betriebe sind mit ihrem gem. EASA Part-66 freigabeberechtigten Personal zugelassen, Komponenten aus der Luftfahrt zu warten bzw. zu überholen. Nach Abschluss der Überholung einer Komponente beginnt die Erfassung der Betriebsdauer für das nächste Nutzungsintervall. Die überholten Bauteile haben damit formal den gleichen Status wie ein neuwertiges Bauteil vor der ersten Nutzung. Gibt es relevante Gründe, aus denen eine Überholung der Komponente nicht durchgeführt werden konnte, muss diese nachweislich unbrauchbar gemacht und entsorgt werden.

Die überholten Komponenten sind in der Regel kostengünstiger als neue Bauteile. Daher lohnt es sich, bei der geplanten Stilllegung eines Altflugzeugs neben dem Ausbau der LLPs auch die OCCMs fachgerecht auszubauen und ggfs. nach Überholung weiterzuverwenden. Der Wert dieser Bauteile hängt direkt von den noch verbleibenden Betriebsstunden oder Cycles ab. Je länger die Restlaufzeit ist, desto größer ist der Wert der Bauteile. Des Weiteren beeinflusst die Anzahl der aktiven Flugzeuge des betreffenden Flugzeugmusters und die Möglichkeit der Verwendung des Bauteils in unterschiedlichen Flugzeugmustern (Grad der Kommunalität) den Wert von gebrauchten Bauteilen: Je größer die Flotte des Flugzeugmusters weltweit ist, umso größer ist die Vermarktungschance und damit auch der Wert des Bauteils.

Wie oben beschrieben, werden die Checks mit steigendem Flugzeugalter immer umfangreicher und resultierend daraus, auch teurer: Für einen D - Check werden z. B. 30.000 Arbeitsstunden angesetzt. Bei einem angenommenen Stundenkostensatz eines Flugzeugmechanikers in Höhe von 68€/h [84] liegen die Personalkosten damit bei ca. 2.04 Mio. €. Weiterhin sind die Kosten des Hallenstellplatzes, das Material sowie die zu überholenden bzw. auszutauschenden Komponenten oder Baugruppen des zu überholenden Flugzeugs hinzuzurechnen.

In der Luftfahrtindustrie bieten Service-Unternehmen die Luftfahrzeug-Vermarktung und betriebswirtschaftliche Schätzungen durch Gutachter (Appraiser) während des Lebenszykluses an. Beispielhaft werden hier die Firma AVMARK Inc.®, die Firma AVITAS® oder die Firma International Bureau of Aviation (IBA) angeführt. Von diesen Firmen wird in regelmäßigen Abständen eine Liste mit Schätzungen der Restwerte von Flugzeugen veröffentlicht. Diese Bewertungslisten sind mit der im KFZ-Bereich gebräuchlichen „Schwacke-Liste“ der Firma Eurotax Schwacke GmbH vergleichbar.

8 Rahmenbedingungen und Prozessbeschreibung für den Rückbau von Altflugzeugen

Im Bereich der Altflugzeuge gibt es derzeit keine Rücknahmepflichten und keine produktspezifischen Behandlungs- und Verwertungsanforderungen, wie beispielsweise für Altfahrzeuge auf Basis der europäischen Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. Insgesamt werden sieben Prozessschritte zugrunde gelegt:

1. Vorbereitung
2. Annahme / Erfassung
3. Trockenlegung und Belüftung der Tanksektionen
4. Schadstoffentfrachtung
5. Demontage
6. Vorzerkleinerung
7. Aufbereitung.

Die ordnungsgemäße Umsetzung dieser Prozessschritte kann nur durch eine entsprechende Qualifizierung des ausführenden Personals sichergestellt werden. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt deshalb neben der Prozessentwicklung auch die notwendigen Maßnahmen zur Schulung der Mitarbeiter sowie die Verhinderung des In-den-Verkehr-Bringens von Teilen zweifelhafter Herkunft.

8.1 Grundlegende Prozessentwicklung zur Entfernung von Gefahr- und Schadstoffen

In Anlehnung an die Altfahrzeugrichtlinie sowie die BMP 3.1 der AFRA und auf Basis des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein vergleichbarer Entsorgungsweg entwickelt. Danach wird aus einem gefährlichen Abfall Altflugzeug (AVV-Nummer 160104*), das zu den Fahrzeugen im Allgemeinen zählt, durch die geeigneten Behandlungsschritte ein ungefährlicher Materialverbund (AVV-Nummer 160106 ohne Sternchen). Dieser ungefährliche Materialverbund kann, wie bereits in Kapitel 3.1.2 beschrieben, wiederum ohne Gefährdungen in die weiteren Aufbereitungs- und Recyclingprozesse gehen.

Ein weiterer Unterschied im End-of-Life-Management von Altflugzeugen besteht im Wesentlichen in der Vielzahl der verwendeten gefährlichen und ungefährlichen Materialien und Betriebsmittel im Vergleich zu Kraftfahrzeugen. Im Bereich der Altfahrzeuge, respektive Altflugzeuge, werden in Abbildung 42 die Abfälle, die der Gruppe 1601 zuzuordnen sind, auf der rechten Seite aufgelistet. Auf der linken Seite werden die Abfälle aufgelistet, die nicht der Gruppe 1601 zuzuordnen und für Altflugzeuge darüber hinaus relevant sind. Für den Umgang mit radioaktiven Materialien, für die das Kreislaufwirtschaftsgesetz nicht gilt (Ausnahme vom Geltungsbereich nach §2 Abs. 2 Nr. 5 KrWG), ist das Atomgesetz (AtG) zu beachten.

In der Luftfahrt werden große Bauteile aus verschiedensten widerstandsfähigen und gewichtseinsparenden Materialien bzw. sehr feste Verbundwerkstoffen verbaut, vgl. Kapitel 5. Daher muss der Prozessschritt der mechanischen Vorzerkleinerung dieser Bauteile nach der Entfrachtung der gefährlichen Abfälle ausreichend ausgelegt sein, um die Materialverbunde für die weitere Verbringung chargierfähig vorzerkleinern zu können.

Für eine effiziente stoffliche Verwertung von Altflugzeugen wurde ein dezentraler Zerlegeprozess untersucht und eine mobile Einheit zum Entfrachten der Schadstoffe sowie zum Rückbau entwickelt und gebaut. Im Rahmen dieser Arbeit wurde am IFAD der TU Clausthal eine Empfehlung für die Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung eines Flugzeugs erarbeitet [43]. Die Handlungsanweisung wurde mit technischer Unterstützung der Lufthansa Technik exemplarisch für einen Airbus A340 - 400 entwickelt. Sie basiert auf dem Wartungshandbuch, dem sog. Aircraft Maintenance Manual (AMM), und wurde in Anlehnung an die Altfahrzeugverordnung entwickelt. Sie ist als freiwilliger Maßstab zu sehen und sollte als Basis von den Flugzeugherstellern gefordert und offen zugänglich für die entsprechenden Flugmuster hinterlegt werden.

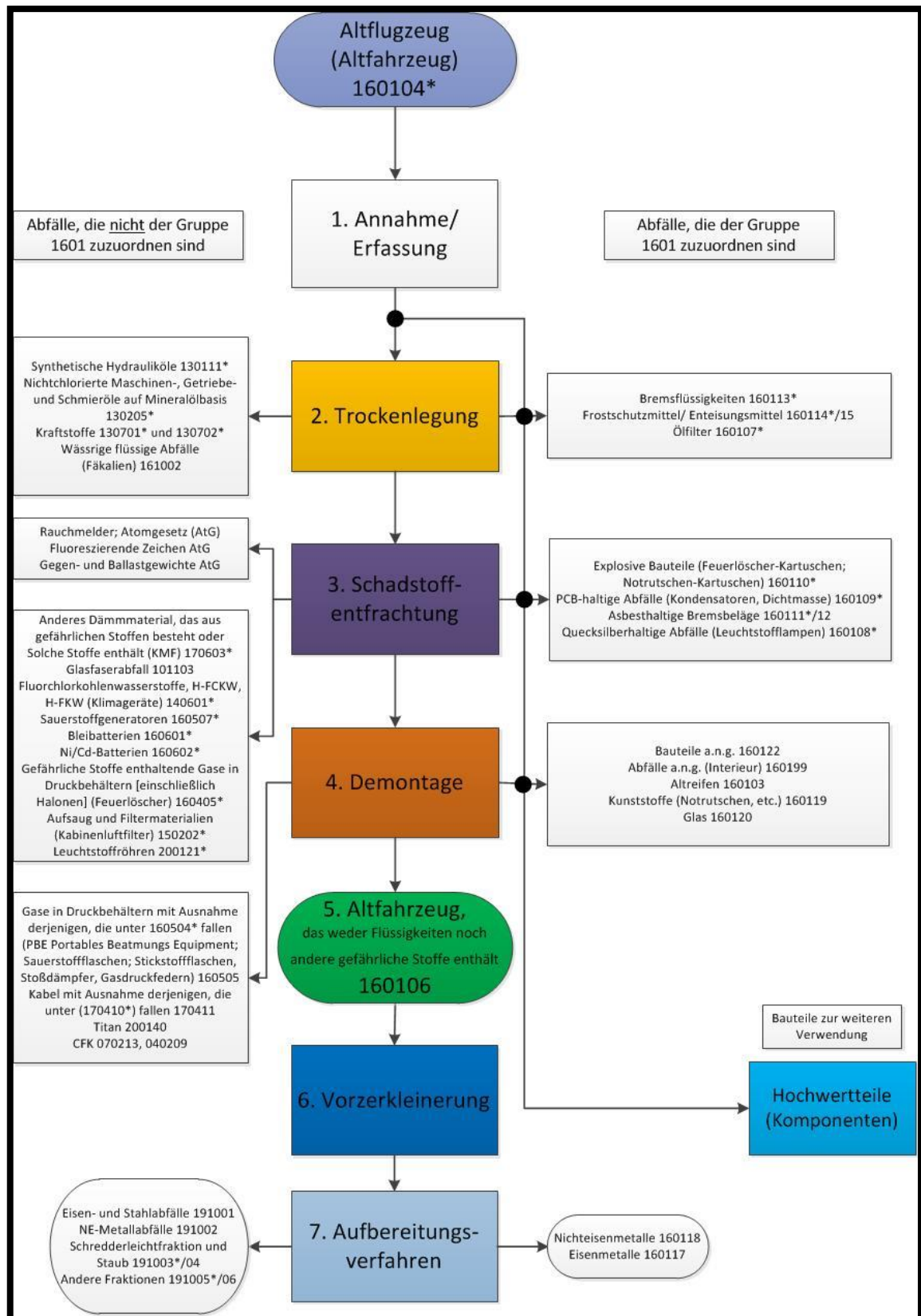


Abbildung 42: Recyclingprozess für Altflugzeuge (eigene Darstellung)

8.2 Vorbereitung der Demontage

Aufgrund der besonderen technischen Anforderungen sind in der Vorbereitung besondere Qualifikationen und Fertigkeiten der Mitarbeiter erforderlich, die neben den Rahmenbedingungen in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Eine adäquate Auswahl und Präparation der Rückbaufläche an Flugplätzen ist ebenfalls zu berücksichtigen. Dieser entwickelte Prozess ist in Abbildung 42 dargestellt. In Bezug auf den grundlegenden Prozesshergang der umweltgerechten / schadstoffarmen Aufbereitung spielt es grundsätzlich verfahrenstechnisch nur eine untergeordnete Rolle, als welcher Abfallverbund z. B. ein Kraftfahrzeug, ein Schiff, eine Industrieanlage oder, im vorliegenden Fall, ein Altflugzeug behandelt wird. Der Prozess der Behandlung von der Annahme eines gefährlichen Abfalls bis zu einem nicht gefährlichen Abfall, der in die Aufbereitung gehen kann, ist von der Abfolge des Behandlungsprozesses und von den Materialströmen verfahrenstechnisch von der Grundstruktur sehr ähnlich, die Umgebungsperipherie ist aber unterschiedlich.

Die hohen Sicherheitsanforderungen an Flugplätzen setzen eine detaillierte und zeitintensive Projektvorbereitung, zusätzliche Qualifikationen der Mitarbeiter und eine entsprechende Auswahl des Equipments voraus. Seit dem 11. September 2001 wurden die Sicherheitsvorschriften durch Sicherheitsmanagementsysteme (SMS) stark verschärft. Grundlage dafür ist die Verordnung (EG) 2320/2002 [85]. In Deutschland wurde die Umsetzung durch das Luftsicherheitsgesetz (LuftSiG) [86] geregelt. Des Weiteren sind die weltweiten Anforderungen der Länder am Rückbaustandort zu beachten.

8.2.1 Qualifikation und Schulung der Mitarbeiter

Personen, die ihre berufliche Tätigkeit auf Verkehrsflughäfen bzw. in luftfahrttechnischen Betrieben ausüben, müssen verschiedene Grundvoraussetzungen erfüllen. Dazu gehört in der Bundesrepublik Deutschland die Zuverlässigkeitsüberprüfung durch die Luftsicherheitsbehörde gemäß § 7 Luftsicherheitsgesetz (LuftSiG) [86]. Des Weiteren wird eine Schulung für sonstiges Personal [87] auf Basis der Luftsicherheits-Schulungsverordnung (LuftSiSchulV) gefordert. Die Arbeitgeber in Deutschland sind darüber hinaus verpflichtet, durch Einhaltung des Arbeitsschutzgesetzes (ArbSchG) die Sicherheit und Gesundheit der

Beschäftigten sicherzustellen [36]. Es besteht die Pflicht, Gefährdungsanalysen und Gefährdungsbeurteilungen von Arbeitsprozessen durchzuführen sowie entsprechende Maßnahmen für die Einhaltung des Arbeitsschutzes zu gewährleisten [36]. Das Unternehmen hat Sicherheitsbeauftragte (bei mehr als 20 Beschäftigten), betriebliche Ersthelfer [36] und eine Zusammenarbeit mit einem Betriebsarzt [38] sicherzustellen. Für die vorbereitende Gefährdungsbeurteilung, die Unterweisung der Mitarbeiter und für die sichere Durchführung von Rückbauprojekten von Altflugzeugen werden deshalb folgende Experten empfohlen:

- Erfahrener Projektleiter
- Qualifizierte Maschinenbediener (z. B. Baumaschinen, Gabelstapler usw.)
- Maschinen- und/oder Betriebsschlosser
- Brandschutzbeauftragter
- Gefahrgutbeauftragter
- Strahlenschutzbeauftragter
- Befähigte Person für den Umgang mit pyrotechnischen Sätzen (Kategorie P1 und P2)
- Fachkraft für Arbeitssicherheit
- Betriebsarzt
- Betriebsbeauftragter für Abfall (im Sinne des §§ 59/60 KrWG)
- Betrieblicher Ersthelfer.

8.2.2 Rückbaufläche

Bei der Auswahl und Vorbereitung einer adäquaten Rückbaufläche für ein Altflugzeug ist darauf zu achten, dass der Boden der Fläche flüssigkeitsdicht ist. Damit wird gewährleistet, dass austretende Betriebsflüssigkeiten aufgenommen werden können, z. B. mit Ölbindemittel zum Abbinden von Mineralölen und Chemikalien, und diese Schadstoffe keinesfalls unkontrolliert in den Untergrund gelangen können.

Weiterhin wurden Versuche durchgeführt, um die sensiblen Hallen- und Vorfeldflächen des luftfahrttechnischen Betriebs oder des Flughafens mit stranggussgezogenen Aluminium-Baustraßensystemen zu schützen. Diese sog. Panel haben folgende Abmessungen 2,50 m*3,05 m*0,043 m und ein Gewicht von 396 kg pro Panel. Sie sind daher nur mit einem kleinen Kran zu

bewegen. Es können pro LKW-Ladung 55 Panel verbracht werden. Dies entspricht dann einer Fläche von $420,75 \text{ m}^2$ pro LKW-Ladung [88]. Um einen ausreichenden Flächenschutz zu gewährleisten, werden je nach Flugzeuggröße zwischen drei und sechs LKW-Ladungen dieser Panels benötigt. Das empfohlene Bodenschutzsystem besteht aus drei Schichten:

1. Folie als Flüssigkeitsbarriere
2. Antivibrationsmatten aus rezykliertem Gummigranulat
3. Panel aus stranggussgezogenem Aluminium.

In Abbildung 43 ist der beschriebene dreischichtige Bodenschutz auf der linken Seite dargestellt. Auf der rechten Seite der Abbildung ist eine massive Material-einwirkung durch die Vorzerkleinerung der Flügel auf den Panels erkennbar. Diese Beschädigungen sind durch den Krafteintrag der Hydraulikschere des Mobilbaggers über das vorher zu zerkleinernde Material entstanden. Es wurde aber nur die obere Schicht der Hohlräume durch das Handling beschädigt, die untere Schicht der Panels wurde nicht beschädigt. Durch diese Art des Aufbaus konnte der sensible, zu schützende Boden ausreichend geschützt werden.

Als Alternative zu dem vorgestellten System können die Alu-Panels durch verbindbare Stahlplatten substituiert und auf der Kunststoffolie und der Antivibrationsmatte verlegt werden. Dieser Aufbau hat den Vorteil, dass es keine Hohlräume zwischen den Schichten gibt und dadurch die Materialschäden der Panels reduziert werden. Der Nachteil ist, dass die Stahlplatten bei vergleichbarer Schutzfläche und -wirkung mehr wiegen.

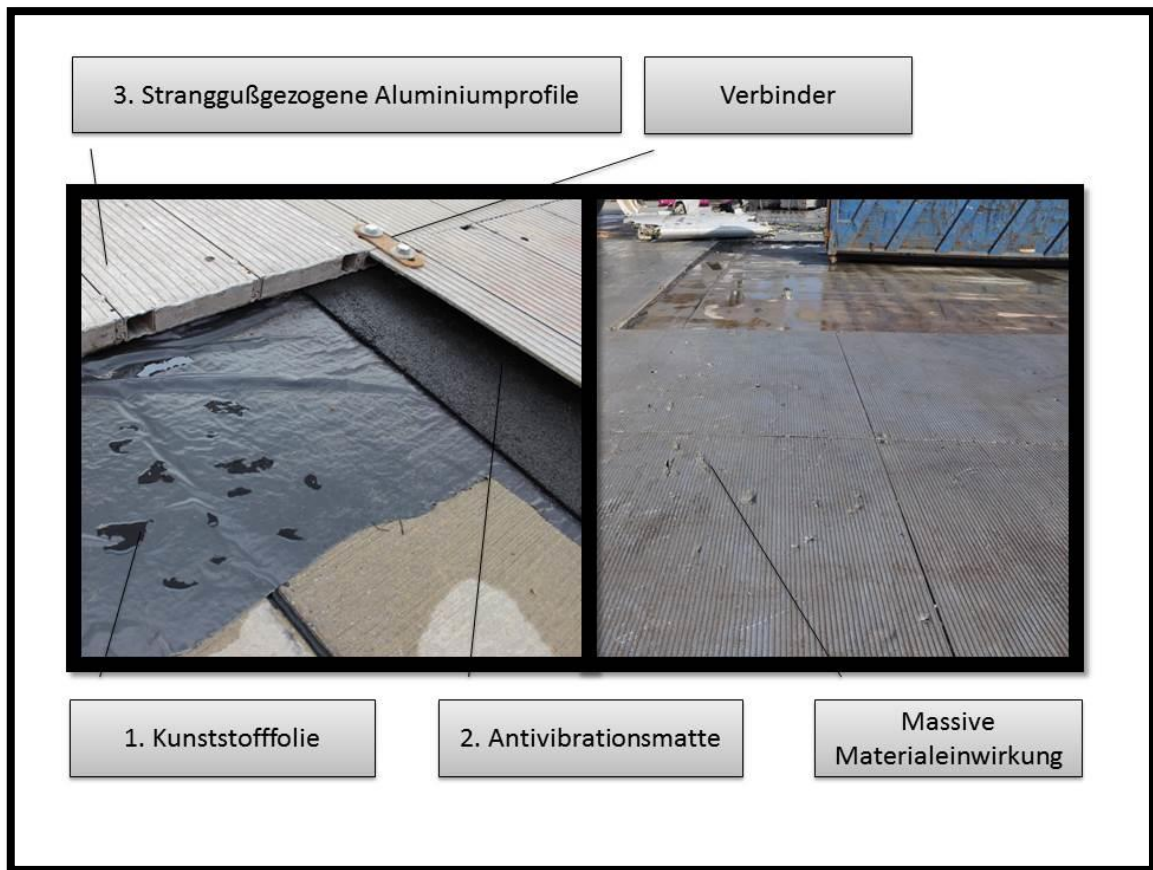


Abbildung 43: 3-Schicht Bodenschutz für Rückbauprojekte (eigene Darstellung)

Bei der Auswahl einer geeigneten Rückbaufäche im Freien ist als weiterer Aspekt der Windeinfluss zu berücksichtigen. Hier gilt es zu beachten, dass die Start- und Landebahn nicht in der Hauptwindrichtung liegt. Es gilt das Gefährdungspotenzial zu minimieren, das durch leichte Materialien entsteht, die durch den Wind von der Rückbaufäche fortgetragen werden können. Diese könnten sonst von den Triebwerken der startenden und landenden Flugzeuge angesaugt werden und zu erheblichen Sachschäden und in Folge möglicherweise Personenschäden führen.

Um den Zutritt unbefugter Personen zur Rückbaufäche zu verhindern, können Bauzaunelemente (Länge 3,5 m und Höhe 2,0 m pro Element) aufgestellt und mit zugehörigen Verbindungselementen verbunden werden. Diese können im Regelfall von regionalen Anbietern gemietet werden [89]. Idealerweise werden die Standfüße der Bauzäune am Boden verschraubt oder mit Erdankern befestigt. Dadurch kann der installierte Zaun Belastungen durch Wind und Böen standhalten. Wenn dies nicht möglich ist, können die Zaunelemente auch mittels Standfüßen, mit einem Eigengewicht von je ca. 35 kg gesichert werden.

Diese Elemente können mit einem winddurchlässigen Sichtschutz (z. B. aus Kunststoff-Netzgewebe) versehen werden. Im Vergleich zu einer windundurchlässigen Folie haben diese Netze den Vorteil, dass sie Sichtschutz gewährleisten (bei Standardmaterial ca. 65 %) bei gleichzeitiger Reduktion (ca. 50 %) der Windlasten durch das Gewebe [90]. Die verbundenen Bauzaunelemente mit entsprechend angebrachten Gewebebahnen sind auf Abbildung 44 dargestellt.



Abbildung 44: Abgegrenzter Sicherheitsbereich mit Bauzaunelementen zum Auslösen einer Rettungsinsel (eigene Darstellung)

Eine weitere Möglichkeit zur Abgrenzung der Rückbaufläche ist die Verwendung von Arbeitsbühnen für den Tragflügelbereich, sog. Wing Docks, soweit diese vor Ort verfügbar sind. Die vorgestellte Möglichkeit bildet eine kostengünstige Alternative zu den vorher beschriebenen Bauzäunen und hat weiterhin den Vorteil, dass sie wesentlich höher und schwerer sind als die Bauzäune. Ihr Einsatz ist in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: Sicht- und Verwehungsschutz mit Wing-Docks (eigene Darstellung)

Der beschriebene Sicherheitsbereich erfüllt folgende Aufgabe:

- Abgrenzung für unbefugte Personen auf dem Flugfeld
- Suspected Unapproved Parts (SUP)-Prävention
- Schutz gegen Verwehung von leichten Materialien
- Sichtschutz
- Brandschutz durch Rauchverbot und installierte Mindestabstände.

Auf Grundlage der Empfehlung der Aircraft Recovery Manuals von Airbus wird ein Sicherheitsabstand von 15m rund um das Flugzeug empfohlen, siehe Abbildung 46. Dieser hat sich auch bei den bislang durchgeführten Rückbauprojekten als ausreichend bewährt.

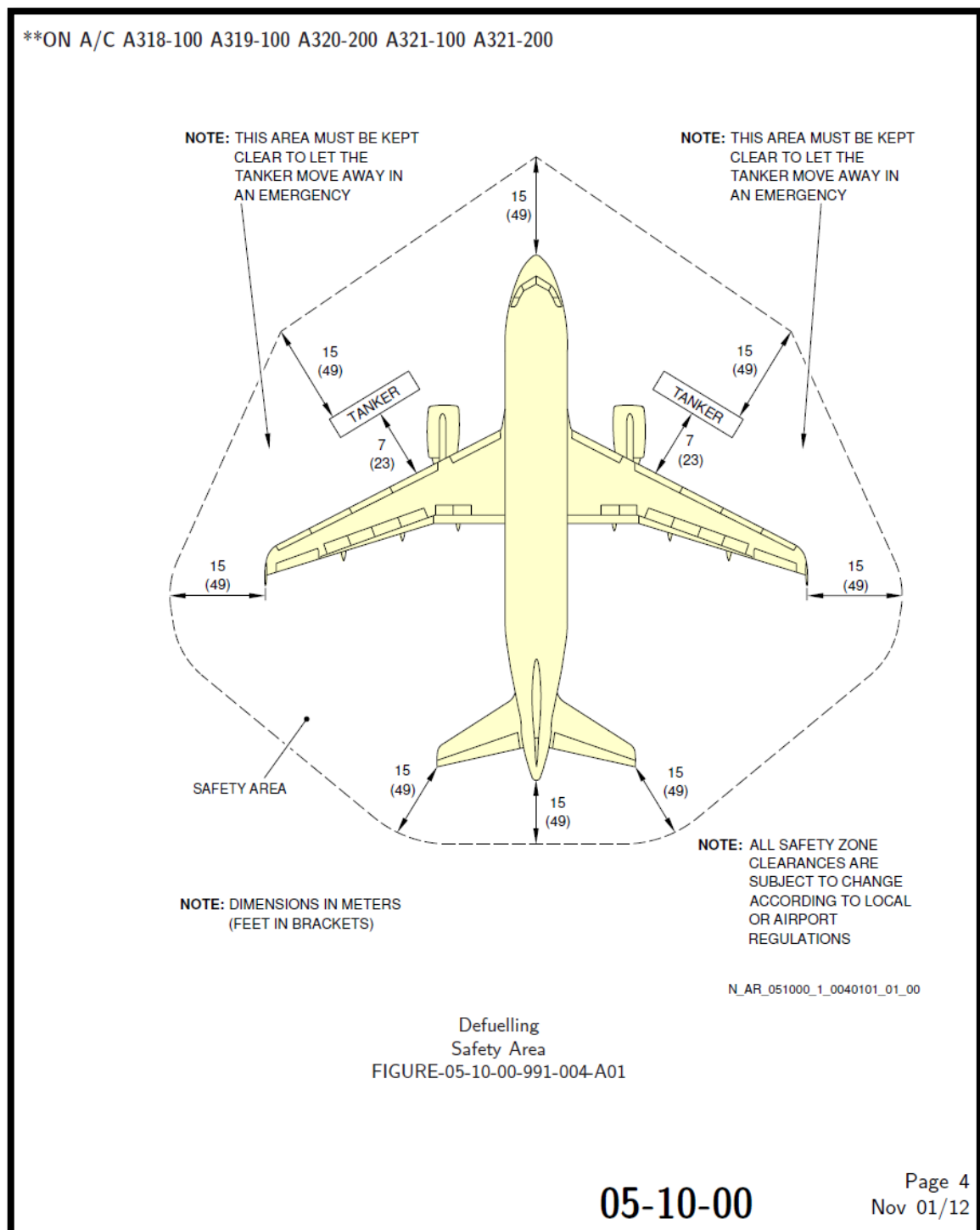


Abbildung 46: Empfohlene Rückbaufläche auf Basis ARM [91]

Die Erfahrungen der durchgeführten Rückbauprojekte haben darüber hinaus gezeigt, dass eine vorherige Rücksprache mit dem Flughafenpersonal, z. B. mit dem Umwelt- und Sicherheitsbeauftragten und der Flughafenfeuerwehr vor Ort empfehlenswert ist. Damit kann ein einvernehmlicher Konsens für die lokalen Anforderungen des Flughafenbetreibers gefunden werden. Auf dieser Grundla-

ge können z. B. die Bauzaunelemente mit adäquatem Abstand zum Flugzeug und entsprechenden Notfallöffnungen aufgestellt werden.

8.3 Annahme und Erfassung

Nachdem die allgemeine Vorbereitung für die Qualifikation des Personals und die Eignung der Rückbaufläche für ein Rückbauprojekt beschrieben wurde, muss zwingend jedes Vorhaben auf die individuellen Anforderungen des Kunden und der regionalen involvierten Partner und Behörden geprüft werden. Dieser erste Prozessschritt ist substantiell, um den zeitlichen und monetären Umfang des Projektes einschätzen zu können. Die folgenden Faktoren sind bei der Annahme eines Projektes zu erfassen und zu bewerten:

- die verfügbare Masse,
- der Standort mit entsprechenden Rückbauflächen,
- die Besitzverhältnisse des Flugzeugs bzw. Altflugzeugs,
- der Zustand und die Herkunft des Altflugzeugs,
- die verfügbare Zeit für die Schadstoffentfrachtung und den Rückbau,
- die Erfassung der enthaltenen Betriebsmittel und Gefahrstoffe,
- die abfallrechtlichen Fragestellungen,
- die zollrechtliche Erfassung und Abwicklung und
- die logistische Fragestellung.

Die einzelnen aufgezählten Faktoren können die zeitliche und monetäre Bewertung eines Rückbauprojektes für Altflugzeuge maßgeblich ändern.

8.4 Trockenlegung

Wie bereits in Kapitel 6.9 beschrieben, befinden sich in einem Flugzeug flüssige, in Teilen gefährliche Betriebsmittel, wie z. B. Kraftstoff, Betriebsöle, Fäkalien und Wasser. Diese Flüssigkeiten können durch entsprechend verfügbare Enttankungssysteme in Tankfahrzeuge enttankt werden. Diverse Tankfahrzeuge sind auf internationalen Flugplätzen verfügbar und können für diese Aufgabe beauftragt werden. Neben der Enttankung stellt die adäquate Entlüftung einen wesentlichen Prozessschritt dar.

8.4.1 Mobile Enttankung von flüssigen Betriebsmitteln der Tanksektionen von Altflugzeugen

Typischerweise findet der eigentliche Rückbau eines Altflugzeugs außerhalb des Hangars auf dem Vorfeld oder einem ausgewiesenen Rückbaubereich, d. h. auf freiem Feld statt. Eine Empfehlung der Flugzeughersteller ist, Flugzeuge im Storage-Modus auf freiem Feld, zum Beschweren mit 90 % des max. Tankvolumens zu befüllen [92]. Der Grund hierfür liegt in der möglichen Gefahr von hohen Wind- bzw. Böenlasten. In den Kraftstofftanks eines Airbus A340 - 300 können ca. 140.640 Liter Kerosin aufgenommen werden. Das bedeutet, dass sich im Storage-Modus auf freiem Feld die beachtliche Menge von ca. 126.000 Litern (90 %) Kerosin in diesem Flugzeug befindet. Der Verfahrensschritt zur Enttankung und erneuten Beschwerung durch entsprechende Ausgleichgewichte und der zugehörigen Belüftung der Tanks, um einer explosionsfähigen Atmosphäre entgegenzuwirken, wird im Folgenden beschrieben.

Für den Kraftstoff Kerosin werden typischerweise weltweit spezielle Flugfeldtankwagen (Be- und Enttankung möglich) mit entsprechend genormten Tankschlauchadaptoren eingesetzt. Sie nehmen einen Großteil des Kraftstoffes durch Druck- bzw. Saugenttankungssysteme auf. Dieser Verfahrensschritt ist in Abbildung 47 dargestellt. Die entsprechende DIN EN 12312-5:2009-08, Luftfahrt-Bodengeräte - Besondere Anforderungen - Teil 5: Betankungseinrichtungen für Luftfahrzeuge [93]; liegt als Norm zugrunde.

Bevor das Kerosin abgepumpt werden kann, muss über eine Probeentnahme geprüft werden, ob dem Kerosin Additive, wie z. B. Biobor EB (Biobor Ethanol Buster), zur Mikroorganismen- und Pilzhemmung zugesetzt wurden [94]. Auf Basis dieser Analyse kann die Betreiberfirma entsprechende Verwertungs- bzw. Entsorgungswege prüfen. Im Fall einer Wiederverwendung des Kerosins wird die Rücktankung über ein standardisiertes Formular mit dem Titel „Auftrag zur Übernahme von Kerosin – Rücktankung“ dokumentiert.



Abbildung 47: Typische Be- und Enttankung am Beispiel einer Boeing B747 - F [95]

Für annähernd die gesamte Restkraftstoffmenge, die nicht über den oben beschriebenen Enttankungsansatz entnommen werden kann, können Ablassventile, sog. Drain valves, verwendet werden. Diese Ventile sitzen an den tiefsten Stellen des jeweiligen Tanks. Ihr eigentlicher Zweck im normalen Betrieb des Flugzeugs besteht darin, sich absetzendes Wasser aus den Kraftstofftanks abzulassen. Da die Dichte von Wasser größer ist als die von Kerosin, setzt sich das Wasser um die Ablassventile herum ab. Die zugehörigen Handlungsanweisungen sind in AMM des jeweiligen Flugzeugmusters zu finden vgl. Kapitel 5. Um das Altflugzeug nach dem Enttanken zu stabilisieren, muss es mit sogenannten Ausgleichgewichten bis zum eigentlichen Rückbau beschwert werden, um den Wind- und Böenlasten entgegenzuwirken.

Die relevanten Mengen der Betriebsöle eines Flugzeugs sind in erster Linie in den Hydrauliksystemen zu finden. Im Sinne der Arbeitssicherheit ist insbesondere darauf zu achten, dass diese Systeme vor der Entfrachtung vollständig druckentlastet sind. In Abbildung 48 ist eine Restentleerung eines Hydraulikbehälters mittels eines Akkuschaubers und eines entsprechenden Auffanggefäßes dargestellt.



Abbildung 48: Restentleerung eines Hydraulikbehälters (eigene Darstellung)

Kraftübersetzende Hydrauliksysteme sind bei Flugzeugen insbesondere in folgenden Funktionsbereichen zu finden:

- Ein- und Ausfahren des Fahrwerks
- Bremsaktivierung
- Bugradlenkung
- Betätigung der Schachtklappen des Fahrwerks
- Höhen-, Seiten-, Querrudersteuerung
- Klappenantriebe im Tragflügel (Stör-, Lande- und Vorflügelklappen).

Die verwendeten Hydrauliköle sind synthetische oder mineralölbasierte Hydrauliköle. Hauptsächlich verwendete synthetische Hydrauliköle sind z. B.:

- Skydrol 500B4
- Skydrol 5
- Skydrol LD-4
- Hyjet IV und V.

In Altflugzeugen können sich in entsprechenden Tanks auch Fäkalien befinden, die unter die AVV-Nummer 161002 fallen. Diese können auch durch Tankfahrzeuge enttankt und entsprechend entsorgt werden.

Zusammenfassend sind in nachfolgender Tabelle 23 die beschriebenen flüssigen Betriebsmittel mit ihrer zugehörigen Abfallschlüsselnummer aufgeführt, für die eine entsprechende umweltkonforme Entsorgung bzw. eine mögliche Verwertung zu gewährleisten ist.

Tabelle 23: Auflistung von flüssigen Betriebsmitteln in Altflugzeugen mit AVV-Nummer

AVV-Nummer	Bezeichnung
130701* und 130702*	Kraftstoffe (Diesel/Kerosin und Benzin)
160113*	Bremsflüssigkeiten
160114* und 160115	Frostschutzmittel
130111*	Synthetische Hydrauliköle
130205*	nichtchlorierte Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis
161002	Wässrige flüssige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 161001 fallen

Für die effiziente Entfrachtung von Restflüssigkeiten aus dem Bereich der Kraftstoffe und Hydrauliköle, die nicht an den Flugplätzen enttankt und abgelassen werden können, wurde eine mobile Enttankungsanlage mit verschiedenen Sonden für flüssige Betriebsmittel in der Luftfahrt entwickelt. Sie besteht aus zwei verzinkten doppelwandigen Quadro Intermediate Bulk Containern - 1000 (IBC), siehe Abbildung 49:

- ein Tankbehälter für „Kraftstoffe allgemein“
- ein Tankbehälter für „Betriebsöle allgemein“

Beide haben eine Zulassung für Straßen-, Schienen- und Seetransport von Seiten der Bundesanstalt für Materialforschung (BAM).

Die Besonderheit des IBC für Kraftstoffe (Stoffnummer, UN1203 bzw. 1863) ist die Eignung für die Aufnahme von Flüssigkeiten mit einem Flammpunkt unter 55°C. Da während des Enttankens eine explosionsfähige Atmosphäre entstehen kann, muss die Anforderung nach Zone 1, ATEX Richtlinie erfüllt werden. Der Flammpunkt von Benzin liegt bei -21°C und der Flammpunkt von Flugzeugkraftstoff, typischerweise Jet-A1, bei +40°C. Zur Vermeidung von Verwechslungen im Betrieb ist dieser IBC mit einer rot lackierten Pumpe gekennzeichnet. In der Abbildung 49 ist es der vordere IBC.

Der hintere Tankbehälter in der Abbildung 49 ist für die Betriebsöle ausgelegt. Deren Flammpunkt liegt hier bei über 55°C und die Gefahr der Entstehung einer explosionsfähigen Atmosphäre ist wesentlich geringer. Der IBC ist daher gemäß Zone 2 der ATEX Richtlinie ausgelegt. Er ist gegenüber dem IBC für Kraftstoff mit einer blau lackierten Pumpe ausgestattet

Die beiden IBC können über folgende Systeme transportiert werden:

- Kranungsmöglichkeit durch ein Vierfachgehänge,
- installierte Staplertaschen für einen Gabelstapler >2 t oder
- Gabelhubwagen oder eigens hierfür entwickelter Lenkhubwagen.



Abbildung 49: Mobile Enttanksanlage für Kraftstoffe und Betriebsöle mit Lenkhubwagen (eigene Darstellung)

8.4.2 Tankbelüftung von Altflugzeugen

Nach der beschriebenen Enttanksung und Trockenlegung müssen die entsprechenden Tanksektionen eines Flugzeugs ausreichend belüftet werden, um der Entstehung einer potenziell explosionsfähigen Atmosphäre vorzubeugen. Für die Belüftung der verschiedenen Tanksektionen können in der Praxis zwei unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt werden.

Zum einen werden bei einem über mehrere Wochen auf freier Fläche geparkten Altflugzeug die Tank- und Wartungskappen, die sog. Mannlochdeckel, komplett geöffnet, dies ist in Abbildung 50 dargestellt. Abgesehen von einer für Ausnahmefälle vorgesehenen Betankungsöffnung auf der Flügeloberseite, befinden sich alle diese Wartungskappen auf der Flügelunterseite des Flugzeugs. Dieses Verfahren funktioniert sehr schnell in ariden Gebieten mit hohen Temperaturen, ist aber aus Umweltaspekten nicht zu empfehlen. Der größte Nachteil an diesem Verfahren ist, dass bei der Verflüchtigung der in den Tanks

verbliebenen Mengen an Restkerosin gesundheitsschädliche BTX-Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol, Ethylbenzole) freigesetzt werden. Weiterhin besteht in der Zeit der Verflüchtigung des Kerosins eine erhöhte Brand- und Explosionsgefahr. In der Zeit der Ausgasung des Kerosins muss daher gewährleistet sein, dass keine Personen im unmittelbaren Gefahrenbereich arbeiten oder sich aufhalten.

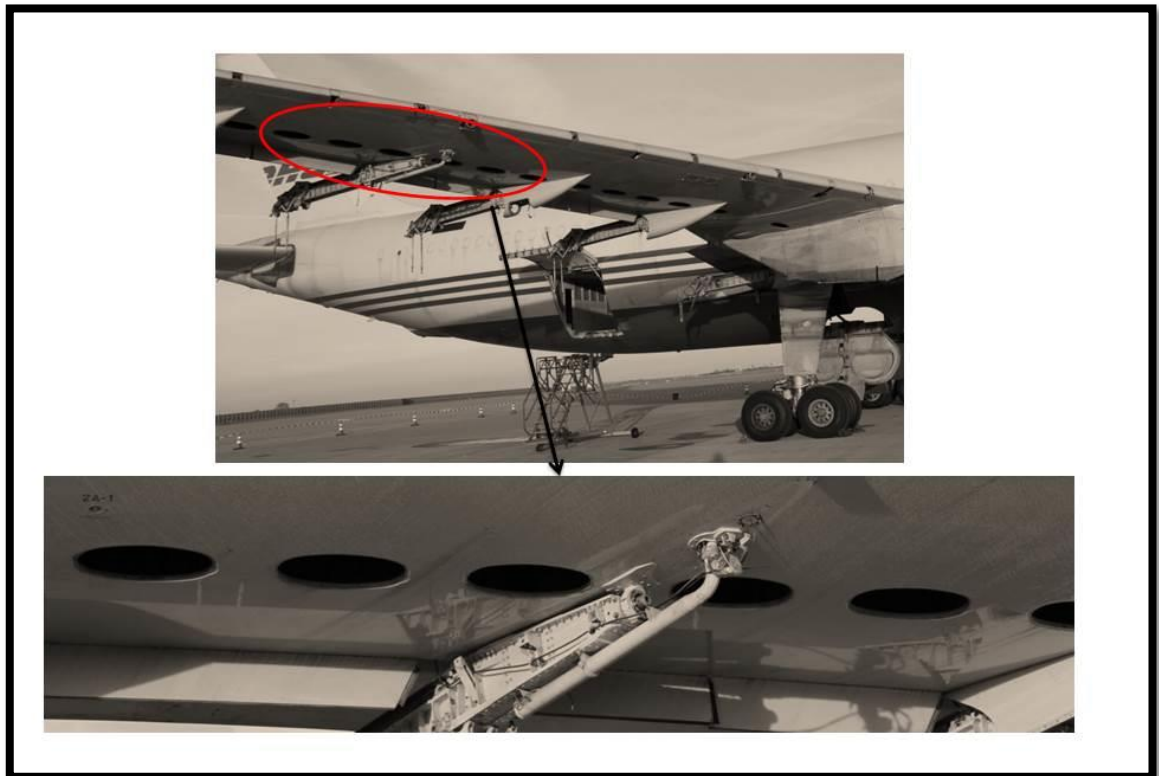


Abbildung 50: Belüftung der Tanksektionen des Tragflügels über Verflüchtigung des Kerosins durch geöffnete Mannlochdeckel beispielhaft an einem Airbus A340B4 – 200 F (eigene Darstellung)

Die umweltfreundlichere und sicherere Variante ist, das Flugzeug aktiv mit einem adäquaten Belüftungssystem zu belüften und diese Abluft dann auch über ein entsprechendes Reinigungssystem zu säubern. Diese Variante schützt die Mitarbeiter vor freiwerdenden Schadstoffen und ist wesentlich temperaturunabhängiger als die Variante Belüftung der Tanksektionen durch geöffnete Mannlochdeckel. Dieses System ist in einer Flugzeugwartungshalle beispielhaft an einem Airbus A310 - 300 in Abbildung 51 dargestellt. Auf der linken Seite ist die Entlüftung der Tragflügeltanks und auf der rechten Seite die Entlüftung des Tanks im Höhenleitwerk abgebildet. Zur Unterstützung des Prozesses können

darüber hinaus noch Belüftungssysteme verwendet werden, um die Zirkulation zu optimieren.

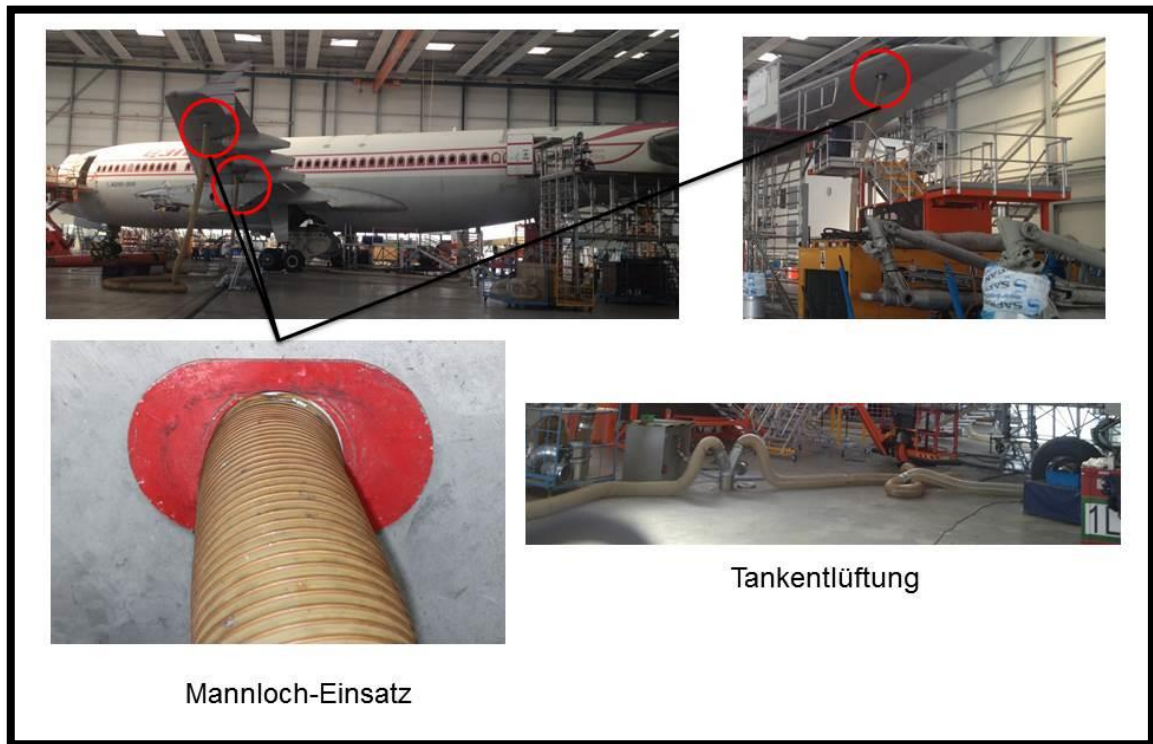


Abbildung 51: Geschlossene Entlüftung der Tanksektionen eines Airbus A310 - 300 mit unterstützender Belüftung in einer Wartungshalle (eigene Darstellung)

Bevor die Demontage und Vorzerkleinerung des Altflugzeugs beginnen kann, müssen die Tanks nach der Belüftung (Flügel- und Centertank) auf eine potenziell explosionsfähige Atmosphäre bzw. auf die untere Explosionsgrenze (UEG) geprüft und über ein entsprechendes Freimessungsdokument freigegeben werden. Die Freimessung wird über ein entsprechendes Explosimeter (z. B. katalytische Wärmetönung oder Infrarot-Messverfahren) durchgeführt. Dieses Messgerät kann explosionsfähige Gas-Luftgemische detektieren. Eine Empfehlung ist, für diese Messung ein Multigaswarngerät einzusetzen, da dieses ein breites Spektrum der brennbaren Gase abdeckt. Diese Messung wird beispielhaft an einem Tragflügel eines Altflugzeugs auf Abbildung 52 dargestellt.

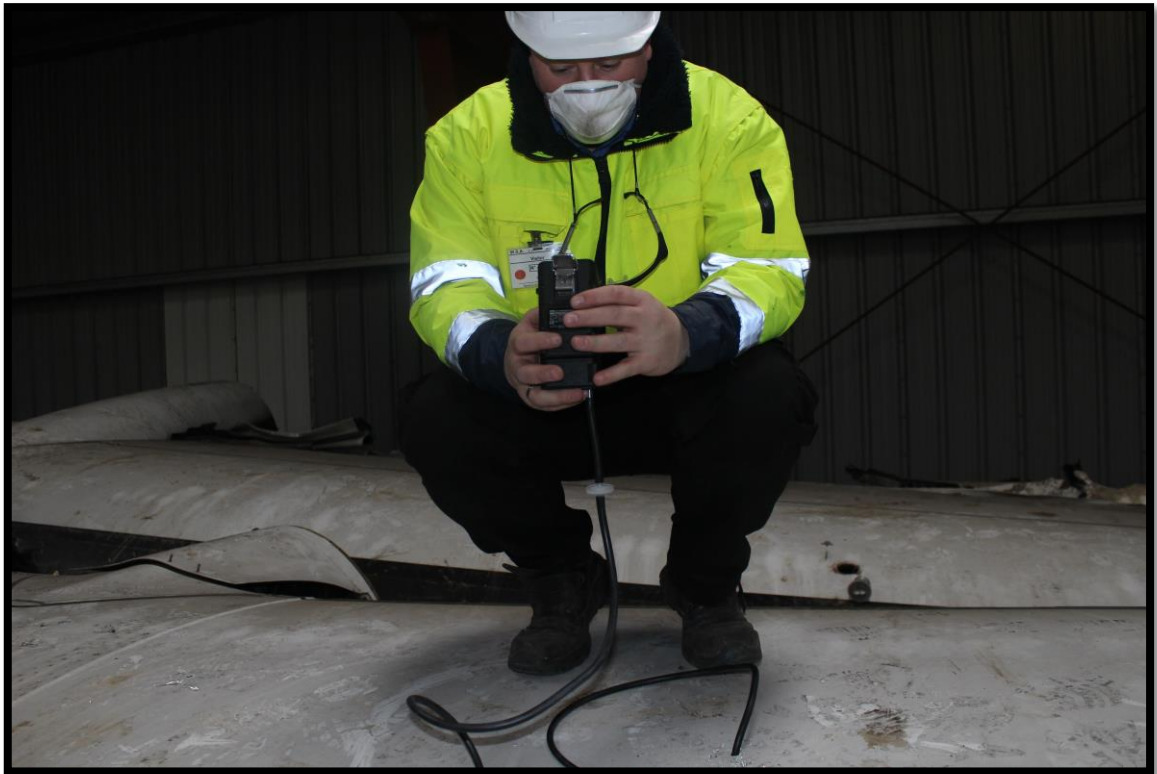


Abbildung 52: Messung von potenziell explosionsfähigen Atmosphären in einem Tragflügel (eigene Darstellung)

Aus der Erfahrung heraus wird empfohlen, den Brandschutzbeauftragten des Auftraggebers und die entsprechende Flughafenfeuerwehr in den Prozess mit einzubinden und das Freimessdokument von der Feuerwehr mit unterschreiben zu lassen. Dieses Dokument kann auch der Versicherung, wenn es gefordert ist, übermittelt werden.

8.5 Demontage von Hochwertteilen und Schadstoffentfrachtung

Um die Wertschöpfung zu steigern, werden die verwertbaren und gewinnbringenden Hochwertteile von einem Part 145 MRO-Betrieb fachgerecht ausgebaut. In der Regel sind das bei ausrangierten Altflugzeugen die Triebwerke und Hilfsturbinen (APU), das Fahrwerk und die Avionik. Beispielhaft ist in der folgenden Abbildung 53 ein hochpreisiges General Electric next-generation (GENx) Triebwerk einer Boeing B747 - 8 mit geöffneter Cowling (Triebwerksabdeckung) dargestellt. Dieses Turbofan-Triebwerk ist der Nachfolger für die

weitverbreitete CF6 Reihe für Großraumflugzeuge von der Firma General Electric.

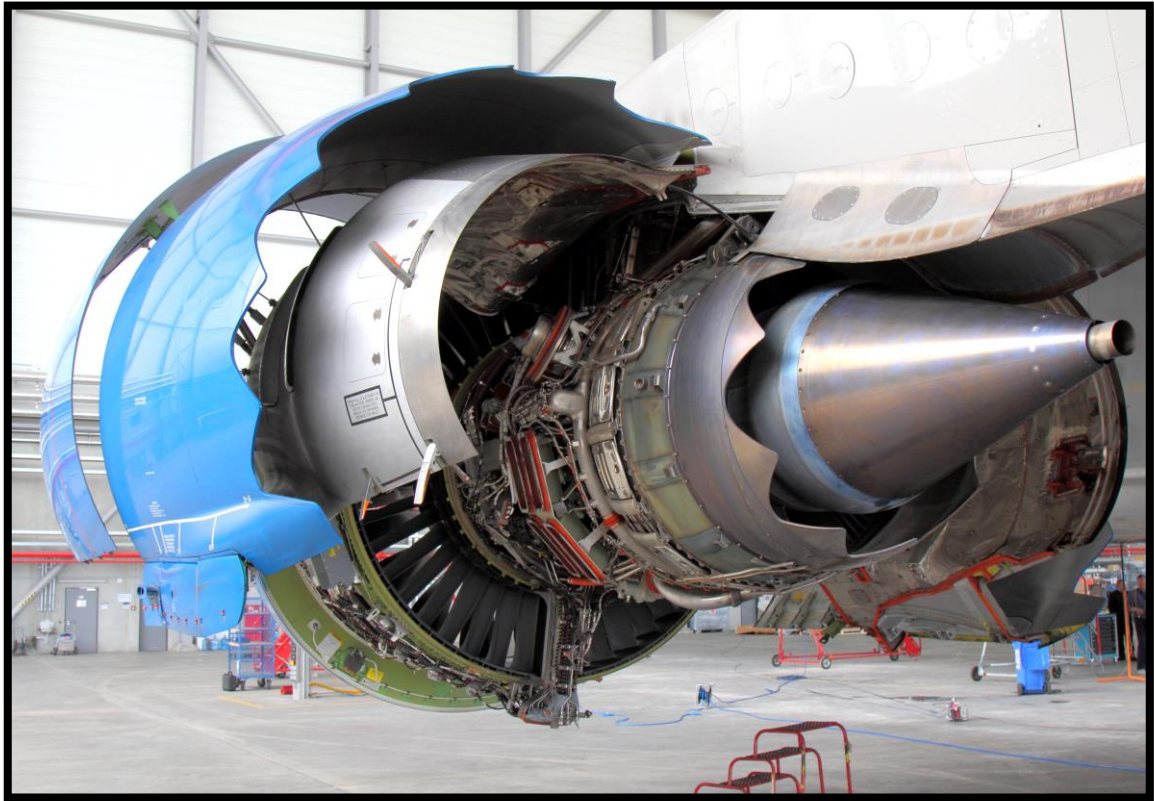


Abbildung 53: Ausbau eines GENx Triebwerks von einer Boeing B747-8 (eigene Darstellung)

Als ein weiteres Beispiel ist in Abbildung 54 das Cockpit eines Airbus A300 - B4 - 200 mit ausgebaute Avionik zum Zeitpunkt der Übergabe an eine Altflugzeug-Verwertungs-Firma dargestellt.



Abbildung 54: Airbus A300 - B4 - 200 Cockpit mit ausgebauter Avionik (eigene Darstellung)

Simultan zur Demontage der Hochwertteile werden die gefährlichen und ungefährlichen Abfälle, wie im Recyclingprozess in Abbildung 42 dargestellt, separiert und fachgerecht entsorgt. Beispielhaft ist in Abbildung 55 der Ausbau der Isolierung aus künstlicher Mineralfaser aus einer Frachtmaschine Airbus A300 B4 - 200 illustriert. Das Isolationsmaterial, das vor dem Jahr 1995 produziert wurde, kann krebserregend sein. Daher sind hierbei die Technischen Regeln für Gefahrstoffe 905 [96] einzuhalten. Im hier beschriebenen Fall nutzen Mitarbeiter bei der Demontage eine speziell zur Verfügung gestellte persönliche Schutzausrüstung (fluoreszierende Arbeitskleidung, Asbestschutzanzug, Mundschutz, Handschuhe, Sicherheitsbrille, Sicherheitsschuhe und Helm), um sich vor den lungengängigen Fasern der Isolierung sowie weiteren potenziellen Gefährdungen zu schützen.



Abbildung 55: Ausbau der Isolierung der Flugzeugkabine eines Airbus A300B4-200 (eigene Darstellung)

In Flugzeugen wurden teilweise radioaktive Strahler verbaut. Exemplarisch seien folgende Bauteile mit Angabe des potenziell radioaktiven Strahlers und den Einbaupositionen aus der Literatur sowie den durchgeführten Rückbauprojekten von Altflugzeugen genannt:

- Ionisationsfeuermelder im Kabinenbereich
(z. B. Americium-241 und Radium 226) [97]
- Triebwerksbereich (z. B. Thorium) [98]
- Fluoreszierende Sicherheitskennzeichnung
(z. B. Tritium und Radium) [99]
- Gegen- und Ballastgewichte (z. B. Uran 238) [100]
 - für die Querruder (Tragflügel)
 - für die Höhenruder (Höhenleitwerk).

In der folgenden Tabelle 24 werden beispielhaft die verbauten Massen an verwendeten Gegen- und Ballastgewichten aus abgereichertem Uran anhand von drei Flugzeugmustern dargestellt. Die Einbauorte sind den zugehörigen Wartungshandbüchern zu entnehmen.

Tabelle 24: Beispielhaft verwendete Masse von abgereichertem Uran als Wolfram Substitut [100]

Flugzeugtyp	Hersteller	Gewicht der enthaltenen Gegengewichte [kg]
DC-10	McDonnell-Douglas	1.000
L-1011	Lockheed	680
B-747	Boeing	850

Im Rahmen der Verwertung von Altflugzeugen besteht daher auch die Verpflichtung, das Vorhandensein etwaiger Strahlungsquellen zu überprüfen. Dieses dient sowohl der Arbeitssicherheit, um das Gefährdungspotenzial von Strahlungsschäden für Mitarbeiter zu minimieren, als auch der fachgerechten Verwertung dieser Materialien. Da Menschen kein Sinnesorgan für ionisierende Strahlung besitzen, müssen entsprechende Informationen von den Flugzeugherstellern und aus den Wartungshandbüchern herangezogen werden. Sollte sich nach der Recherche bestätigen, dass potenzielle Strahlungsquellen vorhanden sind, ist bei diesem Rückbauprojekt der jeweils verantwortliche Strahlenschutzbeauftragte hinzuzuziehen. Dieser koordiniert das weitere Vorgehen in Abstimmung mit der jeweils zuständigen Strahlenschutzbehörde. Für die Lokalisierung der ionisierenden Strahlung sind geeignete Messgeräte einzusetzen.

Die betroffenen Bauteile sind fachgerecht zu isolieren und für eine weitere Zwischenlagerung abzuschirmen. Sie können dann einem professionellen Behandlungsunternehmen nach Abkling- und Endlagerungsbedingungen zur fachgerechten Behandlung übergeben werden. Als praktisches Beispiel ist in Abbildung 56 die Freimessung von Triebwerksteilen durch einen Strahlenschutzbeauftragten mit einem Geiger-Müller-Zählrohr und einer Handsonde dargestellt. Dieses eignet sich für den Nachweis von Alpha- und Gamma-Strahlung. Die Bauteile in den Transportkisten werden mittels einer Handsonde auf ionisierende Strahlung überprüft und bei negativer Aktivität mit definierten Messstellen dokumentiert für die weitere Verwertung freigegeben.



Abbildung 56: Messung auf potenzielle Strahlenquellen bei einem Triebwerk mit einem Geiger-Müller-Zählrohr (eigene Darstellung)

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass in Deutschland die Informationsschrift BGI 723 „Überwachung von Metallschrott auf radioaktive Bestandteile“ [101] zur weiteren Orientierung herangezogen werden kann.

In einem Altflugzeug können insgesamt folgende in Tabelle 25 aufgelisteten gefährlichen Abfälle enthalten sein, die durch eine professionelle Vorbereitung und Messung identifiziert, durch geeignete Schadstoffentfrachtung ausgebaut und einen Fachbetrieb entsorgt werden müssen.

Tabelle 25: Auflistung von gefährlichen Abfällen in Altflugzeugen mit zugehöriger AVV-Nummer bzw. rechtlicher Grundlage

AVV-Nummer	Bezeichnung
160110*	Explosive Bauteile
160109*	Bestandteile, die PCB enthalten
160111*	Asbesthaltige Bremsbeläge
160108*	Quecksilberhaltige Bestandteile
170603*	Anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält
140601*	Fluorchlorkohlenwasserstoffe, H-FCKW, H-FKW
160507*	Gebrauchte anorganische Chemikalien, die aus gefährlichen Stoffen bestehen oder solche enthalten
160601*	Bleibatterien
160602*	Ni-Cd-Batterien
160504*	Gefährliche Stoffe enthaltende Gase in Druckbehältern (einschließlich Halonen)
150202*	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfiler anderweitig nicht genannt (a. n. g.)), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind
Atomgesetz	Rauchmelder
Atomgesetz	Fluoreszierende Zeichen
Atomgesetz	Gegen- und Ballastgewichte

Des Weiteren sind noch folgende Materialien verbaut, die mit einer Ausnahme keinen gefährlichen Abfall darstellen. Diese können problemlos demontiert, auf der Rückbaufläche vorsortiert und in geschlossenen Containern gesammelt

sowie im Anschluss in eine Aufbereitungs- oder Entsorgungsfirma verbracht werden, siehe Tabelle 26.

Tabelle 26: Auflistung weiterer Abfallgruppen in Altflugzeugen mit AVV-Nummer

AVV-Nummer	Bezeichnung
170410*	Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten
170411	Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10 fallen
160120	Glas
160119	Kunststoffe
160103	Altreifen
160199	Abfälle a. n. g.
160122	Bauteile a. n. g.
160505	Gase in Druckbehältern mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 05 04 fallen
1602	Abfälle aus elektrischen und elektronischen Geräten

Der letzte Schritt vor der gesamten Vorzerkleinerung des Altflugzeugs ist der Ausbau der Fahrwerke. Dieser Schritt kann über den Einsatz von hydraulischen Hebern mit sog. Aircraft Jacks durchgeführt werden, siehe Abbildung 57. Eine alternative Möglichkeit besteht im Einsatz von Autokränen unter Nutzung von Hebegurten. Die Rumpfbereiche, an denen die Hebegurte anzulegen sind, um das Flugzeug anzuheben, sind dem ARM (Aircraft Recovery Manual) des jeweiligen Flugzeugmusters zu entnehmen. Das Altflugzeug kann nach dem Ausbau der Fahrwerke auf entsprechende Holzbohlen oder stabile Paletten abgesetzt und stabilisiert werden.

Durch die Enttanking, Schadstoffentfrachtung und Demontage der noch weiterzuverwendenden Bauteile wurde dem Altflugzeug ein nicht unerheblicher Anteil der Gesamtmasse entnommen. Es ist daher darauf zu achten, dass das Altflugzeug mit entsprechenden Ballastgewichten ausgestattet und am Boden

gesichert wird. Hintergrund ist die große Angriffsfläche des Leitwerks und der Flügel für starke Winde und Böen. Es besteht ein erhöhtes Gefährdungspotenzial, da das ungesicherte Flugzeug dadurch unkontrolliert von der Ablagekonstruktion aus Holz rutschen könnte. In der Konsequenz besteht damit die Gefahr, dass Mitarbeiter auf der Rückbaufläche erschlagen werden könnten oder ein Materialschaden am Boden oder dem genutzten Equipment entsteht.



Abbildung 57: Absetzen einer Boeing B737 - 300 von den Aircraft Jacks auf eine Ablagekonstruktion aus Holz (eigene Darstellung)

8.6 Vorzerkleinerung eines Altflugzeugs

Die Vorzerkleinerung des schadstoffentfrachteten Altflugzeugs (mit der AVV-Nummer 160106) auf der Rückbaufläche dient dem Zweck, das Flugzeug chargier- und transportfähig zu machen. Das Ziel ist eine optimale Schüttdichte des vorzerkleinerten Materials für die Verbringung in Container zu erzeugen, um den logistischen Aufwand so gering wie möglich zu gestalten. Für die Vorzerkleinerung eines Altflugzeugs hat sich in der Praxis folgendes Equipment bewährt:

- Mobilbagger mit Schrottschere
- Mobilbagger mit Sortiergreifer
- Mobiler Shredder (2-Wellen-Zerkleinerer)
- Radlader mit Klappschaufel

- Kehrmaschine
- Containersysteme zur Verbringung des Materials
- LKW für die Bewegung des Shredders und der Container
- Autokran (optional).

Im ersten Schritt der Vorzerkleinerung wird das Hecksegment des Altflugzeugs inklusive Leitwerk von einem Mobilbagger mit Schrottschere abgetrennt. Hintergrund ist die Reduktion der Windangriffsfläche und die Verlagerung des Schwerpunkts des Altflugzeugs nach vorne in Richtung Cockpit, um es zu stabilisieren, siehe Abbildung 58. Dieser Prozess kann optional durch einen Autokran unterstützt werden, um zu gewährleisten, dass dieses große Segment nach der Abtrennung nicht unkontrolliert auf den Boden fällt. Diese unterstützende Option ist insbesondere bei hohen Windlasten empfehlenswert, um die sichere und kontrollierte Abnahme des Hecksegments zu gewährleisten.



Abbildung 58: Abnahme des Seitenleitwerks Airbus A300 - B4 (eigene Darstellung)

Das erste abgenommene Segment kann dann am Boden durch den Mobilbagger so vorzerkleinert werden, dass ein mobiler Shredder zur Schüttdichtenoptimierung verwendet werden kann. Bei den bisherigen Rückbauprojekten wurden Zerkleinerungsversuche mit einem mobilen Shredder der Firma EuRec vorgenommen. Der hierfür eingesetzte Zerkleinerer S 16 hat folgende Spezifikation:

Antriebsleistung:	Dieselmotorantrieb ca. 261 kW
Ausführung:	Semimobil auf Hakenliftrahmen
Werkzeugwellen:	2 Rotoren mit ineinander und hintereinander greifenden Werkzeugköpfen
Getriebe Nenndrehmoment:	170.000 Nm
Gewicht:	13 t [102]

Bei den bisher durchgeführten Projekten hat diese Vorzerkleinerung für den größten Teil des jeweiligen Altflugzeugs ohne Probleme funktioniert. Es konnte eine signifikante Steigerung der Schüttdichte von dem vorzerkleinerten Material erreicht werden. In Abbildung 59 ist die Zerkleinerung eines Segments aus dem Rumpfbereich dargestellt. Die einzigen Baugruppen, die durch den Shredder nicht zerkleinert werden konnten, sind die Fahrwerke und der Tank im Flügelmittelfeld. Diese Baugruppen mussten separat verladen und in stationären Anlagen für den weiteren Aufbereitungsprozess zerkleinert werden.



Abbildung 59: Vorzerkleinerung von Altflugzeugsegmenten mittels eines mobilen Shredders (eigene Darstellung)

Durch die mobile Vorzerkleinerung kann das Material direkt in die Container (z. B. Abrollcontainer oder vertikale 20' Standardcontainer) verladen werden. Auf diese Weise wird die Gefahr der Verwehung der leichten Materialien reduziert. Dieses Prinzip ist in Abbildung 60 dargestellt. Weiterhin ist darauf zu achten, dass die Container nach der Beladung für die Zwischenlagerung an der Rückbaufäche unmittelbar verschlossen und abgedeckt werden.

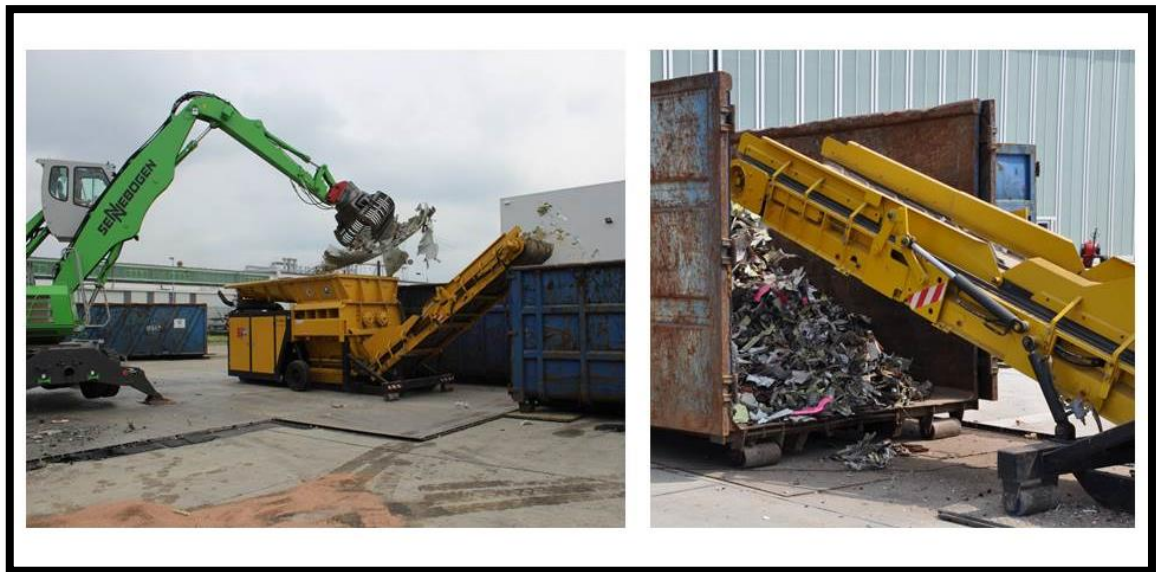


Abbildung 60: Direkte Beladung eines Abrollcontainers durch einen mobilen Shredder (eigene Darstellung)

Im nächsten Schritt werden die Tragflügel des Altflugzeugs, von außen nach innen, beginnend bei der Flügelspitze in Richtung Flügelmittellasten vorzerkleinert. Dadurch wird die Windangriffsfläche des Flugzeugs und damit eine potenzielle Windlast, die auf das Flugzeug wirken könnte, weiter herabgesetzt. In Abbildung 61 ist die Zusammenarbeit von zwei Mobilbaggern bei der Vorzerkleinerung des Tragflügels eines Airbus A310 - 300 illustriert. Der grüne Mobilbagger fixiert den Flügel mit seinem Sortiergreifer. Dadurch kann der gelbe Mobilbagger besser mit der hydraulischen Schrottschere die Struktur des Tragflügels vorzerkleinern. Diese Arbeitsweise für die Zerkleinerung der Tragflügel hat sich als sehr effektiv herausgestellt.



Abbildung 61: Vorzerkleinerung eines Tragflügels mit zwei Mobilbaggern (eigene Darstellung)

Wenn die Tragflügel vorzerkleinert und verladen sind, wird beginnend vom Cockpit in Richtung Flügelmittelkasten der Rumpfbereiche bearbeitet. Das massivste und stabilste Bauteil eines Flugzeugs ist der Flügelmittelkasten. Die Vorzerkleinerung dieser Baugruppe nimmt bei einem Rückbauprojekt einen Großteil der Zeit in Anspruch. Sie kann auch nur bedingt mobil zerkleinert werden und wird zur Schonung der eingesetzten Zerlegewerkzeuge und aus Zeitgründen nur so vorzerkleinert, dass sie in den verwendeten Containern verbracht werden kann. Für den Fall, dass sich das Flugzeug bei dem Rückbauprozess noch auf den Fahrwerken befindet, müssen diese separat freigeschnitten und einzeln (abhängig von der Dimension) verbracht werden. Die Dimensionen sind in Abbildung 62 aufgezeigt. Auf dem oberen Bild ist das Freischneiden des Fahrwerks erkennbar und auf dem unteren Bild die grobe Zerkleinerung des Flügelmittelkastens, damit die Verladung in die Container erfolgen kann.



Abbildung 62: Vorzerkleinerung Fahrwerk und Center-Wing-Box (eigene Darstellung)

Die vorzerkleinerten Materialien werden anschließend zur stofflichen Verwertung in eine geeignete Aufbereitungsanlage verbracht.

8.7 Verhinderung des In-den-Verkehr-Bringens von Teilen zweifelhafter Herkunft

Zur weiteren Nutzung ausgebaute hochwertiger Komponenten müssen diese in einem Hangar oder auf der Rückbaufläche von Fachpersonal ausgebaut, gekennzeichnet und neu zertifiziert werden. Wenn dieser Vorgang nicht korrekt vorgenommen und einwandfrei dokumentiert wird, führt dies zu Bauteilen zweifelhafter Herkunft, sog. Suspected Unapproved Parts (SUP). Wenn Bauteile bewusst falsch gekennzeichnet und zertifiziert werden, ist dies ein krimineller Vorsatz und das Bauteil ist ein Fälschungsbauteil, sog. Bogus Part. Diese gefälschten Bauteile sind käuflich auf dem Schwarzmarkt zu erhalten, haben aber keine sichere und zuverlässige Funktion, da sie nicht gemäß den zugelas-

senen Instandhaltungsunterlagen geprüft worden sind. Des Weiteren sind die geforderten Begleitpapiere nach Luftrecht gefälscht. Diese Bauteile stellen daher ein sehr hohes technisches Sicherheitsrisiko dar.

Aus diesem Grund müssen alle Bauteile, die nicht mehr verwendet werden, insbesondere hier die lebenszeitbegrenzten Bauteile (LLP) nachweislich und mit Dokumentation der jeweiligen Seriennummer vernichtet werden. Der Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e. V (BDLI) hat eine Empfehlung zur Vermeidung von SUP herausgegeben. Diese Empfehlung basiert auf den Vorgaben der EASA Part 145.A.42. d2 und des LBA Rundschreibens Nr. 01-35/00-1. Sie sollte als Mindestanforderung für den Umgang mit ausgebauten Bauteilen und Komponenten aus Altflugzeugen angesehen werden. In dieser Empfehlung ist der Prozess für die Entnahme von Bauteilen für einen erneuten Einbau oder deren dokumentierte Vernichtung beschrieben, vgl. Abbildung 63.

In der Praxis werden in Zusammenarbeit zwischen Flugzeugeigentümer und Part 145 MRO-Betrieb die vom Part 145 MRO-Betrieb entnommenen, hochpreisigen Bauteile anhand einer vollständigen Liste aller serialisierten Bauteile des Altflugzeuges dokumentiert. In einem zweiten Schritt wird die vorschriftsmäßige Vernichtung aller verbliebenen serialisierten Bauteile von Seiten der verantwortlichen Rückbaufirma dokumentiert, vgl. Kapitel 5.4.

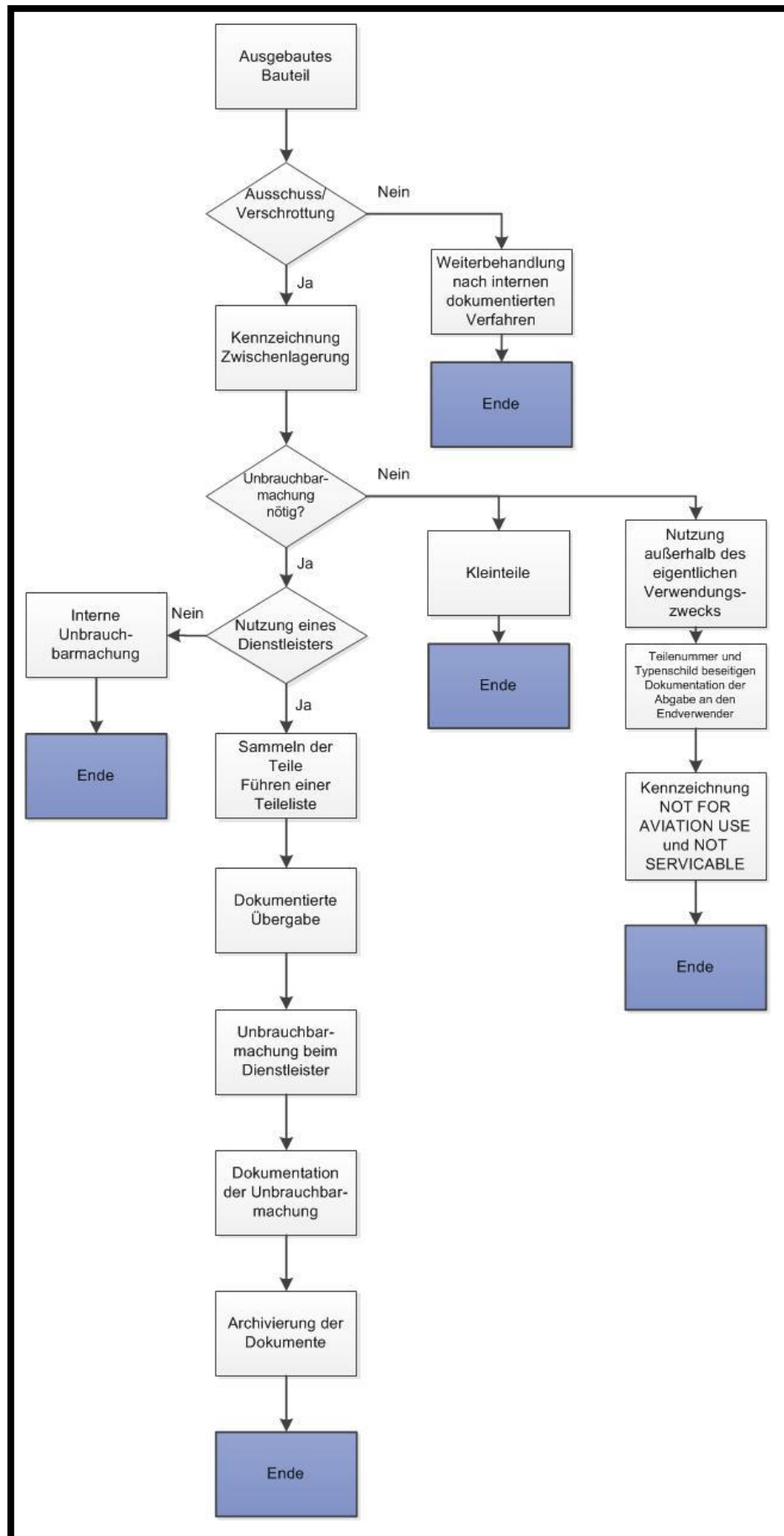


Abbildung 63: Empfohlener Ablauf Unbrauchbarmachung [103]

8.8 Ausblick auf zukünftige Gesetzesgrundlagen für die Altflugzeugverwertung und Vorschläge zur Vorgehensweise

Derzeit gibt es, wie bereits dargestellt, keine spezielle produktbezogene gesetzliche Regelung für den Umgang mit stillgelegten Altflugzeugen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass sich (wie in der Automobilbranche durch die Altfahrzeugrichtlinie der EU oder die EU-Verordnung für das Recycling von Schiffen) mittelfristig eine gesetzliche Regelung für den umweltgerechten Umgang mit Altflugzeugen etablieren wird. Dieses kann dann z. B. durch eine Altflugzeugverordnung umgesetzt werden. Es sei aber darauf hingewiesen, dass die zu entsorgenden Altflugzeuge auf Basis der Masse einen verschwindend geringen Bruchteil, im Verhältnis zu Schiffen und Kraftfahrzeugen, darstellen. Anfang des Jahres 2015 waren allein in Deutschland ca. 60,4 Mio. [33] Kraftfahrzeuge gemeldet. Die weltweite Flugzeugflotte ist mit ca. 24.000 [104] aktiven Großraum-Flugzeugen, bezogen auf die Masse, eher als eine Nische anzusehen. Eine politische Möglichkeit, den ökologischen Rückbau zu fordern, wäre die Produktverantwortung mit entsprechenden Rücknahme- und Recyclingprogrammen für die Hersteller, um eine Sicherung der wertvollen Materialien zu gewährleisten.

Derzeit sind ausschließlich Informationsblätter und Handlungshilfen auf freiwilliger Basis verfügbar, die den Umgang mit den Bauteilen und Materialien bei der Altflugzeugverwertung, speziell im Bereich der Schadstoffentfrachtung, unterstützen können:

- BMP 3.1 [105]
- List of radioactive and hazardous elements [106]
- White Paper,
Use of Depleted Uranium as Weights in Commercial Airplanes [107]
- Aircraft rescue and firefighting charts [108]
- Aircraft maintenance manuals (AMM)

Die beschriebenen Rahmenbedingungen für den Rückbau von Altflugzeugen und das vorgestellte Fließschema für einen Behandlungsprozess in Abbildung 42 (S. 98) wurden auf Grundlage des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, des Wasserhaushaltsgesetzes und in Anlehnung an die Altfahrzeugverordnung aus der Kenntnis der enthaltenen Materialien und Bauteile des Altflugzeugs entwickelt. Der dargestellte Prozess bietet die Möglichkeit, eine umweltgerechte Schadstoffentfrachtung der den entsprechenden Abfallschlüsselnummern (AVV-Nummern) zugeordneten gefährlichen Abfälle den passenden Entsorgern und Aufbereitern zuzuweisen und entsprechende Entsorgungsnachweise für diese Materialien zu erstellen.

Zu Beginn des Prozesses fallen Altflugzeuge mit der AVV-Nummer 160104* „Altfahrzeug mit Flüssigkeiten und anderen gefährlichen Stoffen“ an. Dieser zunächst gefährliche Abfall wird entsprechend dem in Deutschland geltenden Rechtsrahmen schadstoffentfrachtet und darf nach Beendigung der Behandlungsschritte mit der AVV-Nummer 160106 „Altfahrzeug ohne Flüssigkeiten und andere gefährliche Stoffen“ auf dem betonierten Vorfeld an den Flugplätzen vorzerkleinert und in die konventionelle Aufbereitung eines Recyclingunternehmens verbracht werden. Die Abfallschlüsselnummern gelten europaweit.

Da die Anfalldichte von Flugzeugen an den weltweiten Rückbauflächen übersichtlich ist und Überführungsflüge in der Regel aus ggf. technischen und betriebswirtschaftlichen Gründen nicht möglich sind, wurde an Stelle eines stationären Ansatzes, wie beim PAMELA-Projekt, im Rahmen des MORE-AERO Projektes ein mobiler Ansatz gewählt, um Altflugzeuge der stofflichen Verwertung zuzuführen. Dieser mobile Ansatz kann die in diesem Kapitel beschriebenen Rahmenbedingungen umsetzen. Mit einer „Mobilen Einheit“ können Altflugzeuge und die darin enthaltenen Werkstoffe weltweit fachgerecht und unter Beachtung der Umweltaspekte einer geordneten Verwertung zugeführt werden. Dieser Ansatz wird im folgenden Kapitel 9, Technische Umsetzung des Rückbauprozesses in Form einer mobilen Einheit, vorgestellt.

9 Technische Umsetzung des Rückbauprozesses in Form einer mobilen Einheit

Luftfahrtunternehmen, die ihre Flugzeuge z. B. aus wirtschaftlichen Gründen vorübergehend stilllegen, parken diese bevorzugt in ariden Gebieten. Dort werden sie im sog. Prolonged Parking oder Storage-Modus geparkt und technisch nach Luftfahrtregularien lufttüchtig (sog. Flight-Ready Condition) instandgehalten. Wenn diese Flugzeuge nicht mehr in den aktiven Dienst rückversetzt werden, können sie bei Bedarf im zweiten Schritt als Hochwertteilelager für die noch betriebene Flotte dienen. Der Vorteil der ariden Gebiete sind die trockenen klimatischen Bedingungen und die daraus resultierende niedrige Luftfeuchtigkeit. Korrosion und Oxidation der verbauten metallischen Werkstoffe treten bei den Flugzeugen dadurch nur in vermindertem Umfang auf. Die Notwendigkeit, die Planung und der Aufbau der mobilen Einheit werden im Nachfolgenden im Detail beschrieben. Des Weiteren wird auf die weltweite Verbringung der mobilen Einheit und der vorzerkleinerten Materialien in die entsprechenden Aufbereitungsanlagen eingegangen.

9.1 Notwendigkeit eines mobilen Ansatzes zum Altflugzeugrecycling

Aufgrund des durchaus vorhandenen Potenzials an recyclingfähigen Altflugzeugen aus dem militärischen Bereich sei hier ein Beispiel aus diesem Sektor in den USA angeführt. So sind u. a. in Tucson, Arizona, auf der Davis-Monthan Air Force Base, über 4.000 militärische Flugzeuge und 6.000 Triebwerke weitestgehend im gewarteten Zustand geparkt, siehe Abbildung 64 (Stand 2013).



Abbildung 64: Geparkte Militärflugzeuge am Standort Tucson 309 AMARG, Arizona, USA (eigene Darstellung)

Ein Großteil der Altflugzeuge, die nicht mehr aktiv betrieben werden, steht dem Recycling in Europa zurzeit nicht zur Verfügung. Dies hat verschiedene Gründe:

- In Europa gibt es nur wenige geeignete aride Gebiete
- Parkgebühren für Flugzeuge sind gegenüber Schwellen- und Flächenländern vergleichsweise hoch
- Instandhaltungspersonal ist verglichen mit Schwellenländern teurer
- Gegenüber Flächenländern gibt es vergleichsweise wenige hinreichend große Stellplätze.

Typischerweise werden diese potenziell zur Ausmusterung anstehenden Flugzeuge aus Europa an einen Standort mit aridem Klima, z. B. Süden der USA, überführt. Die Kosten für einen solchen Überführungsflug (Ferry Flight) zwecks Parken oder zur Hochwertteilengewinnung können u. U. sehr hoch sein und sind daher bei einer kommerziellen Gesamtbetrachtung des möglichen Verwertungsszenarios mit zu berücksichtigen. Sie variieren stark in Abhängigkeit von unterschiedlichen Grundvoraussetzungen. Hierzu zählen u. a.:

- Größe des Flugzeugs (Start-, Lande- und Parkgebühren)
- Flugzeugmuster und Anzahl der Triebwerke (Kerosinverbrauch)
- Flugstrecke (Gebühren für Flugsicherung und Flugplanung sowie Kerosinverbrauch und ggf. Anzahl der erforderlichen Piloten)
- Personenstundensätze am Zielort des Parkens (Wartungs- bzw. Demontagearbeiten).

Wie in Tabelle 27 aufgeschlüsselt, würde beispielsweise ein zehnstündiger Überführungsflug eines Airbus A340 - 300 von Europa in die USA in der

Größenordnung von ca. 100.000 € kosten. Die Überführungskosten eines größeren Widebody, wie z. B. einer Boeing B747, sind höher, insbesondere aufgrund des höheren Treibstoffverbrauchs.

Tabelle 27: Kostenabschätzung für den Überflugsflug eines Airbus A340 - 300 mit 10 Stunden Flugzeit und anschließend 12 Wochen Parken in den USA [109]

Kostenzusammensetzung	Kosten (abgeschätzt)
Flight-Crew (2 Piloten)	18.000€ (Gesamteinsatz 3 Tage plus Rückflugtickets)
Technische Crew (2 Techniker)	16.000€ (Gesamteinsatz 3 Tage plus Rückflugtickets)
Flugplan Erstellung	1.500€
Kerosinverbrauch 6t/h und durchschnittlich 1.000€/t Kerosin	60.000€
Start- und Landegebühren	3.000€
Zwischensumme Ferry Flight	98.500€
Parken in Flight Ready Condition (12 Wochen umfassen 380 Personalstunden bei 40€/h)	15.200€
Parkgebühren variable (80€/Tag)	6.720€
Summe	120.420€

Neben dem Ansatz, auszumusternde Flugzeuge in ariden Gebieten für die weitere Nutzung bzw. Verwertung abzustellen, gibt es Fälle, in denen ein kostenintensiver Überflugsflug nicht mehr rentabel ist. So betreiben beispielsweise viele Airlines in Schwellenländern ihre Flotten im sog. Low-Cost-Bereich. Da bei diesem Geschäftsmodell alle Kostenanteile typischerweise auf ein Minimum reduziert werden, kann das auch eine negative Auswirkung auf Wartung und damit den technischen Zustand der Flugzeuge haben. Erreicht ein Flugzeug dieser Airlines das Lebensende, ist in der Regel

davon auszugehen, dass ein Überführungsflug nicht mehr rentabel oder technisch möglich ist.

Für sicherheitskritische Luftfahrtunternehmen kann die EU Betriebsuntersagungen für den europäischen Luftraum verhängen. In der sog. „Schwarzen Liste“ der EU sind über 300 Unternehmen aufgelistet, die in Europa nicht operieren dürfen. Diese Liste kann als Indikator dafür genutzt werden, abzuschätzen, in welchen Regionen der Welt sich Altflugzeuge verstärkt ansammeln können bzw. angesammelt haben. Abbildung 65 veranschaulicht, in welchen Ländern der Welt diese sicherheitskritischen Luftfahrtunternehmen operieren.

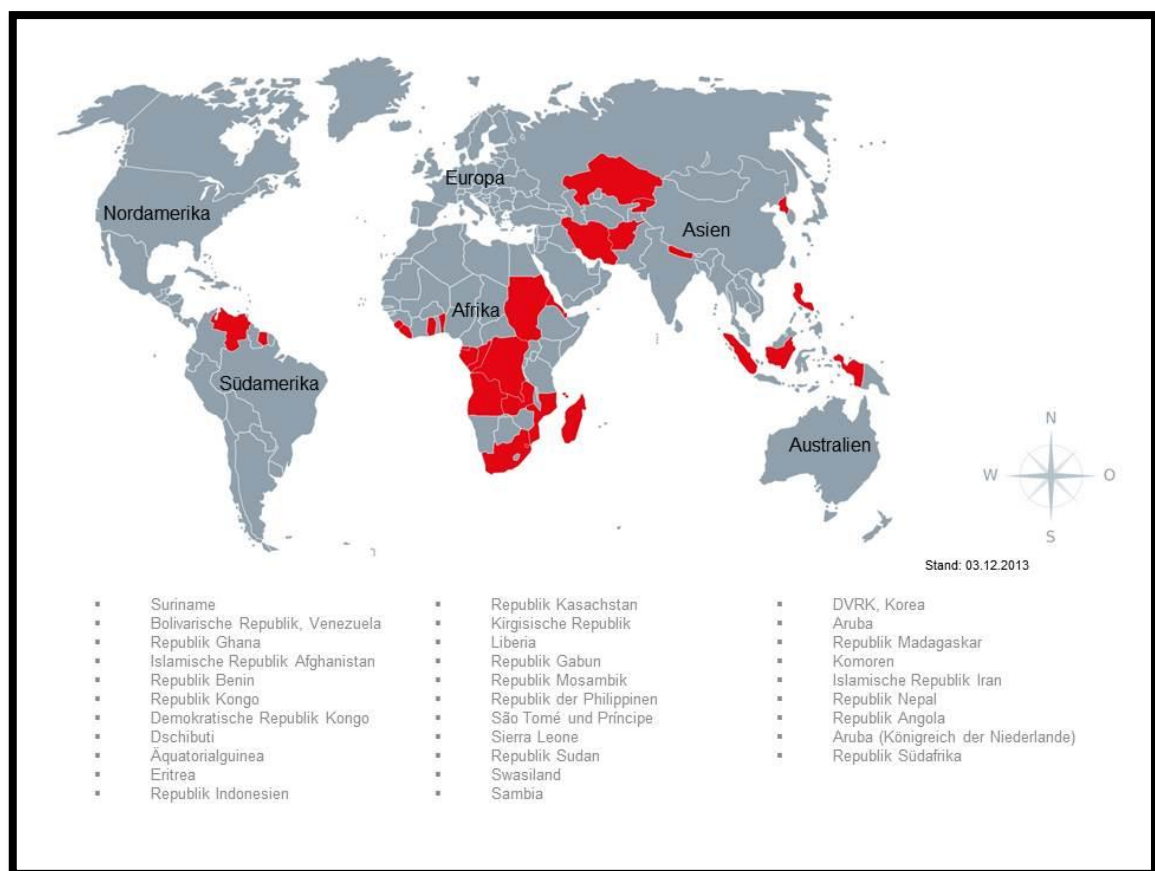


Abbildung 65: Liste von Staaten mit Luftfahrtunternehmen, deren Luftfahrtbetrieb in der EU untersagt ist [110]

Im Rahmen der leitenden Mitarbeit im Forschungsprojektes MORE-AERO (vgl. Kapitel 2.4), welches der vorliegenden Dissertationsschrift zugrunde liegt, und weiterer darüber hinaus gehender Untersuchungen wurde eine technisch innovative, mobile Einheit entwickelt und gebaut. Diese kann in modularisierter Form autark betrieben werden. In der Nutzung des an der Umsetzung beteiligten Entsorgungsfachbetriebs Keske Entsorgung GmbH ermöglicht sie

es, das Material- und Rohstofflager der international vorhandenen Altflugzeuge effizient auszuschöpfen.

Durch den vorgestellten autarken und mobilen Ansatz können Altflugzeuge an jedem Standort der Welt umweltkonform schadstoffentfrachtet, trockengelegt, vorzerkleinert und in geeignete Aufbereitungsanlagen abtransportiert werden. Eine Überführung der Altflugzeuge ist durch diesen Ansatz obsolet.

Die modular aufgebaute Einheit mit dem entsprechenden Equipment ist in zwei 20 Fuß Standard Seecontainern untergebracht:

- Eine Containereinheit zur Trockenlegung und zur Schadstoffentfrachtung
- Eine Containereinheit zur Vorzerkleinerung.

Die Container mit Abmessungen gem. Tabelle 28 sind so konzipiert, dass sie per LKW als Sattelkraftfahrzeug mit Containerchassis transportiert werden können.

Tabelle 28: Verwendete 20 Fuß Standardcontainer

Normmaße	Länge	Breite	Höhe
Außen: mm	6.058	2.438	2.591
Innen: mm	5.867	2.330	2.261

ISO 668 mit einer Maßtoleranz von max. $\pm 10\text{mm}$, Innenmaße können je nach Bauart und verwendetem Material abweichen [111].

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die mobile Einheit auf angepasste Abrollchassis zu kranen und diese dann mit einem Abrollkipper-LKW im Zug zu den entsprechenden Zielorten zu bewegen. Die max. in Deutschland erlaubten und eingehaltenen Dimensionen der Containereinheit sind:

- | | |
|---|--------|
| - Größte Länge Sattelkraftfahrzeug | 16,50m |
| - Größte Länge Lastzug, z. B. Abrollkipper-LKW | 18,75m |
| - Größte Breite für alle Fahrzeuge | 2,55m |
| - Größte Höhe für alle Fahrzeuge | 4,00m |
| - Höchstzulässiges Gewicht fünf- oder sechssachsiger Lastzüge | 40 t |
| - Höchstzulässiges Gewicht fünf- oder sechssachsiger Sattelkraftfahrzeuge [112] | 40 t |

Die modularisierten Einsätze für den Rückbau sind auf Basis der DIN ISO-Norm 668 [113] bzw. DIN 15190 102 [114] und unter Einhaltung der Richtlinie 96/53/EG [112] in 20 Fuß-Standardcontainern (Twenty-foot Equivalent Unit, TEU) untergebracht. Über dieses System können die Container weltweit kostengünstig mit der Standard Transportkette über Land und zu Wasser transportiert werden.

Die Abbildung 66 zeigt die entwickelte mobile Einheit auf einem Abrollkipper-LKW mit den angefertigten Abrollchassis (RAL 4003, erikaviolette Unterseite) für die 20 Fuß Seecontainer und einem entsprechenden Deichsel-Anhänger der Keske Entsorgung GmbH.



Abbildung 66: Mobile Einheit Altflugzeugrecycling Keske Entsorgung GmbH [115]

9.2 Planungs- und Entwicklungskosten für die mobile Einheit

Bei der Projektierung des Projektes „Mobile Einheit“ wurde im ersten Schritt ein Businessplan durch die Firma Keske Entsorgung GmbH erstellt, um eine wirtschaftliche Umsetzbarkeit des geplanten Projektes zu prüfen. Die Erstellung dieses Businessplans wurde durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Der vorgestellte Business Case wurde von den Gesellschaftern des Unternehmens als positiv bewertet und war der offizielle Beginn des neuen Geschäftszweiges des Unternehmens und des Projektes

„Altflugzeugrecycling“. Weiterhin wurde der Businessplan als Grundlage für die Gespräche mit potenziellen Investoren verwendet.

Auf Basis des definierten Zieles des Businessplans wurde ein Prozess für das „Dezentrale Flugzeug-Recycling-Projekt“ entwickelt. Der betrachtete Projektzeitraum, im Rahmen eines Produktentstehungsprozesses (PEP) vom Start des Projektes mit der definierten Produkt-Mission (PM) bis zum Start of Production (SOP) zur Umsetzung des Projektes in das operative Tagesgeschäft der Firma Keske Entsorgung GmbH, umfasste vier Jahre und lief vom 01. März 2011 bis zum 30. April 2014. Dieser Prozess beinhaltete schwerpunktmäßig die Konstruktion und Herstellung der mobilen Containereinheiten zur Trockenlegung und Vorzerkleinerung sowie einen definierten Probelauf zur Erprobung an beispielhaften Demontageprojekten.

Eine finanzielle Unterstützung für dieses Projekt wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des „KMU Innovativ Programms“ geleistet und im Rahmen des Forschungsprojektes „MORE-AERO“ gefördert. Der Projektzeitraum für dieses Projekt wurde vom 01. Mai 2012 bis zum 30. April 2014 angesetzt. Der Projektzeitraum wurde um 6 Monate bis zum 30.09.2014 verlängert. Die gesamten Projektaufwendungen für Entwicklung und Bau der mobilen Einheit sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Kalkulation der mobilen Einheit

Aufwendungen:	Summe
Businessplan Entwicklung	22.000,00 €
Mobile Einheit Trockenlegung	57.905,00 €
Mobile Einheit Vorzerkleinerung	121.623,42 €
Projekt-Entwicklungskosten	226.600,00 €
Gesamtaufwand	428.128,86 €

9.3 Container Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung

Der Inhalt des ersten Containers „Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung“ ist auf die Verwendung innerhalb einer eingezäunten Rückbaufläche auf Flughäfen für die Trockenlegung, Schadstoffentfrachtung und Belüftung der Treibstofftanks von Altflugzeugen ausgelegt. Die operative Umsetzung dieses Prozessschritts ist in Kapitel 8.2.2 beschrieben. Auf dem Containerboden ist eine Auffangwanne mit einem Fassungsvermögen von 2,15 m³ installiert. Im Fall einer Havarie ist dies ausreichend dimensioniert, um mögliche Leckagen aus den Tanksystemen aufzunehmen, siehe Abbildung 67.

Auf der rechten Seite des Containers wurde eine Fahrspur eingearbeitet, in der vier IBC-Behälter mit je 1.000 Liter Fassungsvermögen fixiert und gesichert werden können. Zwei der IBC-Behälter (Intermediate bulk Container) sind aus verzinktem Stahl und mit einem Motor und einer Pumpe zum Enttanken von Betriebsflüssigkeiten aus Flugzeugen ausgestattet; die anderen beiden sind aus Kunststoff und können als Zwischenlager genutzt werden. Auf der linken Seite des Containers sind Schränke für das Verstauen von technischem Equipment installiert. Es ist Werkzeug für das Freischneiden und Sichern von Bauteilen, wie z. B. das Cockpit für Simulatoren, vorhanden. Es stehen auch Messgeräte für eine Freimessung von potenziellen explosiven Atmosphären und potenziellen radioaktiven Quellen zur Verfügung. Es ist Ölbindemittel für die sofortige Aufnahme von ausgetretenen Betriebsmitteln von der Oberfläche verstaut. Des Weiteren ist dort auch die persönliche Schutzausrüstung und eine Erste Hilfe Ausrüstung für die Mitarbeiter enthalten.

Die eingebaute elektrische Verteilung (für die Beleuchtung und den Ventilator dieses Containers) ist so konzipiert, dass sie nach ATEX-Betriebsrichtlinie, Zone 1, explosionsgeschützt ist. Es wurde ebenfalls eine Zwangsentlüftung installiert, die vor dem Öffnen der Containertür aktiviert wird. Dies ist eine technische präventive Maßnahme für den Fall, dass ein explosionsfähiges oder giftiges Medium durch Leckagen der zwischengelagerten Betriebsmittel entstehen könnte. Gerade in ariden Gebieten, wie z. B. Afrika, in denen eine Verflüchtigung der Flüssigkeiten durch die Wärme beschleunigt wird, kann so eine ausreichende Zwangsbelüftung des Containers gewährleistet werden.

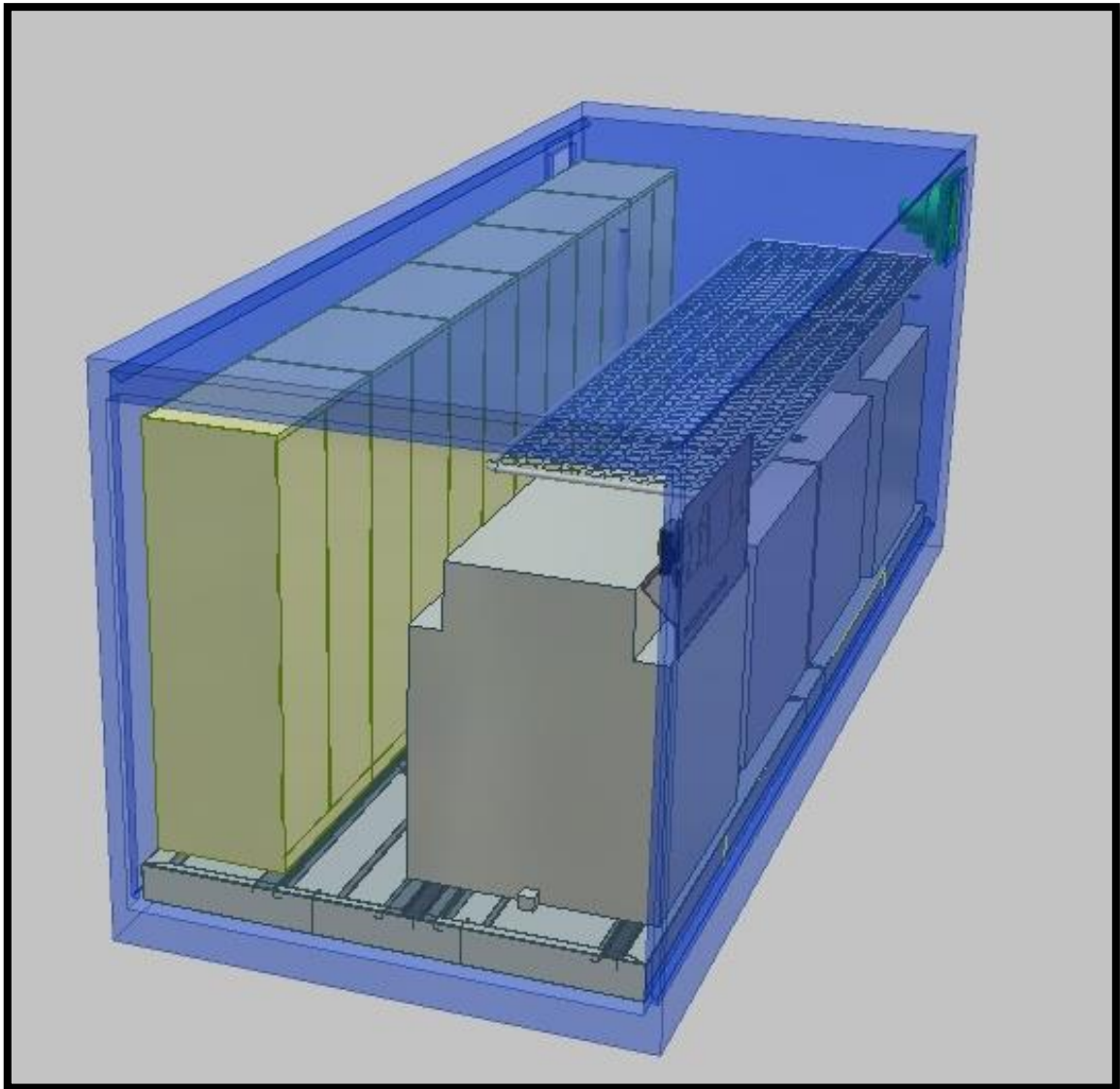


Abbildung 67: Darstellung Containereinheit Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung [116]

Wenn der Container entladen worden ist und sich keine Betriebsmittel-IBC-Behälter im Container befinden, kann die Ablagefläche auf der rechten Seite über den IBC-Behältern heruntergeklappt werden. Dadurch kann der Container als geschützter Werkstattraum mit verschiedenen Arbeitsflächen und einer Werkbank umgestaltet werden.

9.4 Container Vorzerkleinerung

Im zweiten Container „Vorzerkleinerung“ ist zum einen die unabhängige Stromversorgung, durch ein leistungsstarkes Diesel-Aggregat untergebracht. Das Aggregat ist vibrationsarm durch Gummipuffer auf einem Gestell im

hinteren oberen Bereich des Containers mit einer integrierten Schallschutzhaut installiert. Es wurden ein Abgassystem und eine Zwangsbelüftung für die Kühlung des Motoraggregats in den Container eingebaut, siehe Abbildung 68.

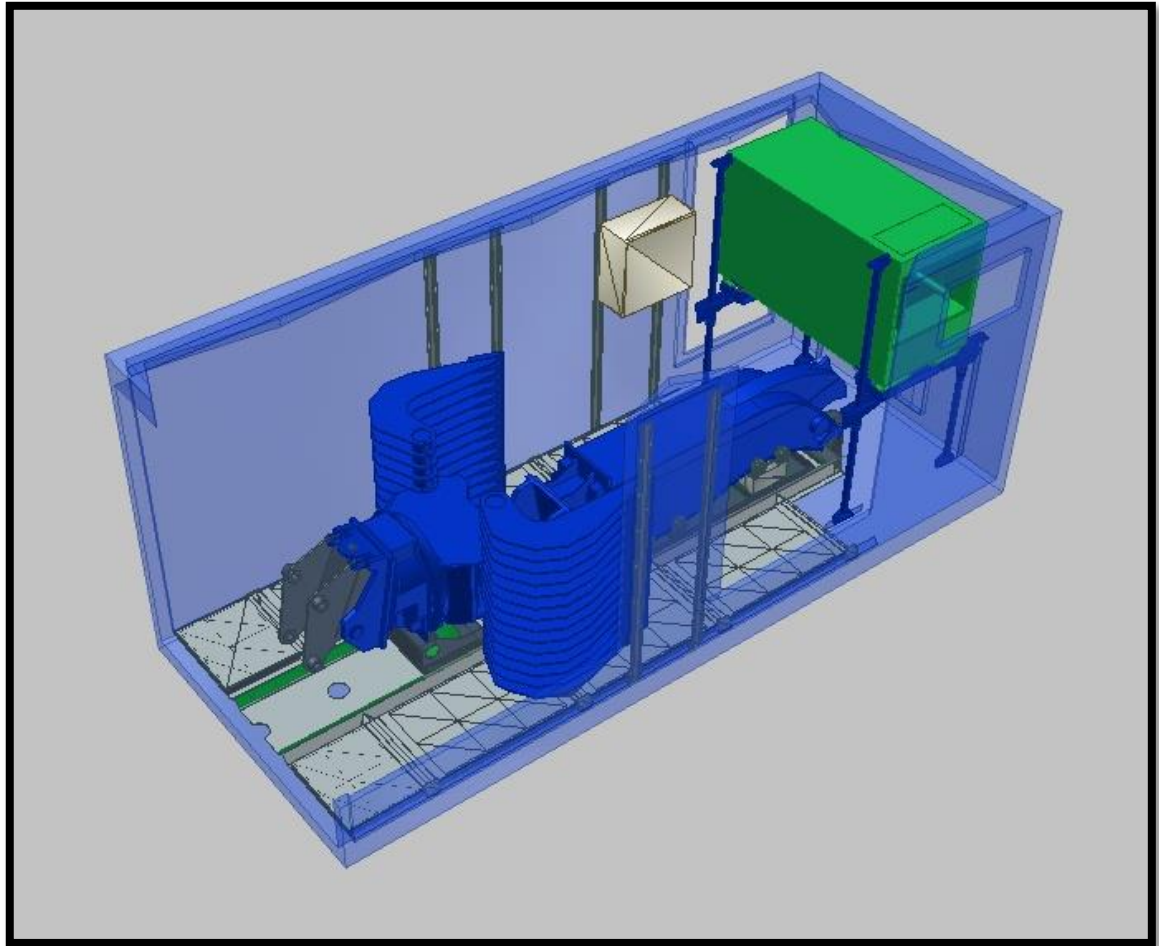


Abbildung 68: Darstellung Containerereinheit Vorzerkleinerung [116]

Zum anderen wurde ein Schlittensystem für die zu adaptierende Schrottschere und den Sortiergreifer an einem Trägergerät, z. B. ein Mobil- oder Kettenbagger, entwickelt. Die Anbaugeräte sind auf einem Gleitbett gelagert, das sehr gute Gleiteigenschaften und eine hohe Verschleißfestigkeit besitzt. Dieser Schlitten ist auf einem robusten Gleitbett auf der verstärkten Unterseite des Containerbodens installiert. Durch den heruntergesetzten Gleitwiderstand kann das Trägergerät die Anbaugeräte über dieses Schlittensystem und ein baggerseitiges Schnellwechselsystem aufnehmen und wieder in den Container ablegen. Für den weltweiten Transport kann durch eine kombinierte kraft- und formschlüssige Ladungssicherung eine ausreichende, sichere Befestigung der Anbaugeräte gewährleistet werden.

Das System ist so konzipiert, dass weltweit Trägergeräte von verschiedenen Herstellern für die Rückbauprojekte von Altflugzeugen angemietet werden können. Hersteller sind z. B.:

- Atlas Maschinen GmbH
- Caterpillar
- Doosan
- Hyundai
- Komatsu
- Liebherr
- Terex
- Volvo
- Zeppelin.

Nach einer Trägergerät-Entscheidung wird vor dem Projektbeginn zum Einsatz der mobilen Einheit eine entsprechende, angepasste Anbauplatte für die gemietete Baumaschine hergestellt, die dann auch für Folgeprojekte verwendet werden kann. Diese kann dann baggerseitig mit dem passenden Schnellwechsler adaptiert und eingesetzt werden. Durch diese Entscheidung wird eine große Flexibilität bei der Auswahl von Mietträgermaschinen in verschiedenen Ländern geschaffen. Der Bagger kann die angepassten hydraulischen Werkzeuge mit den entsprechenden Schnellwechslern aufnehmen.

9.5 Verbringung und logistische Umsetzung der mobilen Einheit und des vorzerkleinerten Materials

Die Standardcontainer der mobilen Einheit können zum einen per Sattelzugmaschine mit Containerchassis transportiert werden und zum anderen auf Abrollchassis gekrant werden, um diese mit einem Abrollkipper-LKW bewegen zu können. Für ein Rückbauprojekt müssen folgende Maschinen und Materialien international verbracht werden:

- die Mobile Einheit (Zwei 20' Container)
- die Mobilbagger (einer mit Sortiergreifer und einer mit Schere)
- der Shredder (Vorzerkleinerung zur Schüttdichtenoptimierung)
- der gewonnene Sekundärrohstoff (vorzerkleinertes Altflugzeug).

Bei dem Transport der einzelnen Positionen kommt es nicht nur auf eine komplikationsfreie, schnelle und günstige Logistikkette an. Es ist auch empfehlenswert bei der Verzollung der Im- und Export-Sendungen eine umfangreiche Zoll-Beratung mit einem adäquaten Zoll-Management in Anspruch zu nehmen. Es können zum einen die normalen Zollverfahren genutzt werden, diese sind z. B.:

- Ausfuhrverfahren
- Überführung in den zollrechtlich freien Verkehr (mit Statuswechsel)
- Versandverfahren (ohne Statuswechsel)
- Vorübergehende Verwendung.

Überwiegend wird bei der Verbringung der „Mobilen Einheit“ die vorübergehende Verwendung genutzt. Es ist aber bei jeder Verbringung zu prüfen, wie die aktuellen zollrechtlichen Gegebenheiten im Zielland ausgestaltet sind. Weiterhin ist zu prüfen, ob ein Carnet ATA (Admission Temporaire) über Verwendung des Carnet ATA-Vordrucks ohne aufwendige Förmlichkeiten aus dem Zollgebiet der Europäischen Gemeinschaft (EG) aus- und wiedereingeführt werden kann [2]. Diese Möglichkeit muss aber immer im Einzelfall geprüft werden, ob dieses auch wirklich sinnvoll ist. Denn teilweise sind in den Mitgliedsländern die ATA-Gebühren hoch (höher als die Finanzierungskosten bei Stellung der Einfuhrabgaben als Sicherheit) oder aber, bspw. in Indien erlaubt bei Einfuhr der Container nur die Verbringung an einen beschriebenen Ort, dann muss wieder ausgeführt werden. D.h. hier wären keine zwei Rückbauorte in

einem Schritt umsetzbar. Hier ist eine Zollexpertise nötig, welche bei jedem Projekt aufs Neue überprüft werden muss, da Regelungen erfahrungsgemäß laufend verändert werden können.

Ein Rückbauprojekt lässt sich grundsätzlich in zwei Prozessflüsse aufteilen. Der erste ist der Transportprozess der mobilen Einheit, welcher auf der linken Seite der Abbildung 69 dargestellt ist. Die mobile Einheit gilt es bei Beginn eines Projekts aus Deutschland heraus zum Projektstandort zu verbringen. Bei der Grafik wurde angenommen, dass dieser Standort außerhalb der EU liegt. Dies bedingt zollrechtlich eine vorübergehende Ausfuhr aus Deutschland und eine vorübergehende Einfuhr in ein Nicht EU-Land. Nach Abschluss des Rückbauprojektes wird die mobile Einheit wieder in die EU zurückgeführt. Die vorübergehende Einfuhr im Nicht-EU-Land wird abgeschlossen, wie die vorübergehende Ausfuhr bei Wiedereinfuhr nach Deutschland. Evtl. Verbräuche von in der mobilen Einheit vorhandenen Betriebsstoffen (wie z. B. Öle, Schmierfette, Kraftstoffe usw.) sind entsprechend anzumelden.

Der zweite Transportprozess ist der Transport der im Rückbauprojekt gewonnenen Sekundärrohstoffe. Diese können beispielsweise im Land des Rückbaus verbleiben oder nach Deutschland zurückgeführt werden. Die dargestellte Grafik illustriert die Rückführung nach Deutschland. Im Gegensatz zum Transport der mobilen Einheit handelt es sich hier um eine reguläre Ausfuhr und die Einführung zum freien Verkehr in Deutschland. Dies bedeutet, dass der Status der eingeführten Sekundärrohstoffe von Nicht-Gemeinschaftsware zu Gemeinschaftsware geändert wird. Dies ist notwendig, um über das Material frei verfügen zu können [117].

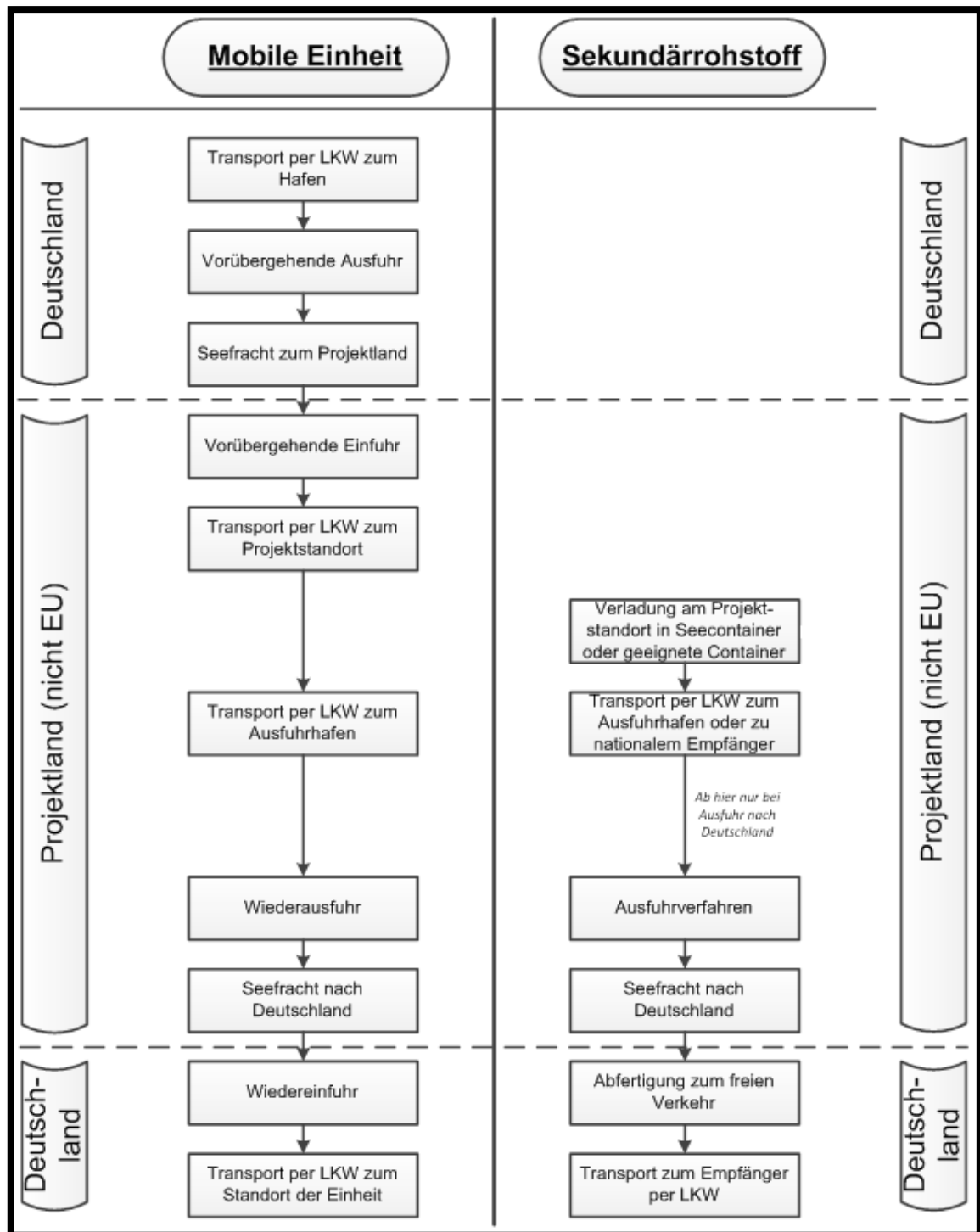


Abbildung 69: Logistisches Prozessfließbild für die mobile Einheit und den Sekundärrohstoff des Altflugzeugs [118]

Der ungefährliche Abfall mit der beschriebenen AVV 160106 ist mit folgender Deklaration bereit zur Verbringung in eine Aufbereitungsanlage, vgl. Tabelle 30.

Tabelle 30: Abfallbezeichnung

AVV 160106	Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeit noch andere gefährliche Bestandteile enthalten [119]
OECD Code GC040	Fahrzeugwracks nach Entfernung aller darin enthaltenen Flüssigkeiten [120]
Basel-Code B1250- Grüne Liste	Altkraftfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Komponenten enthalten [121]

Des Weiteren kann für die internationale logistische Verbringung des Aluminium-Schrotts die Zolltarifnummer 76020090, Schrott aus Aluminium („ausg. Schlacken, Zunder usw. aus der Eisen- und Stahlherstellung, die wiedergewinnbares Aluminium in Form von Silicaten enthalten“, Rohblöcke [Ingots] und ähnliche Rohformen, aus eingeschmolzenen Abfällen oder Schrott, aus Aluminium, Aschen und Rückstände der Aluminiumherstellung [122]), bzw. der Basel-Code B1250 der Grünen Liste verwendet werden [121]. Die im Allgemeinen ungefährlichen Abfälle auf Grundlage der Basler Konvention zur Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung enthält.

10 Aufbereitungsmöglichkeiten eines Altflugzeugs

Nach der zuvor beschriebenen Trockenlegung, Schadstoffentfrachtung und Vorzerkleinerung, die auch international über die vorgestellte „Mobile Einheit“ abgewickelt werden kann, ist das Material aus dem Altflugzeug vorbereitet für die beschriebene Verbringung in eine adäquate Aufbereitungsanlage.

Die Schwerpunkte des folgenden Kapitels liegen in der Vorsortierung, den Aufbereitungs- und entsprechenden Verwertungsmöglichkeiten von Aluminiumlegierungen in Altflugzeugen. Es werden mögliche Aufbereitungsverfahren näher erläutert, um den Sekundärrohstoff in die optimale metallurgische Route absetzen zu können.

10.1 Mögliche Vorsortierung an der Rückbaufäche

Im Rahmen der Demontage von Altflugzeugen können bestimmte Materialien direkt auf der Rückbaufäche in verschließbare Behälter (Schutz gegen Verwehungen) vorsortiert und verbracht werden. Diese (z. B. Interieur, Kabel, Avionik, Elektronikschrott, Reststoffe zur energetischen Verwertung und Beseitigung) Stoffe sind exemplarisch in Tabelle 26 aufgeführt. Des Weiteren sind größere markante und leicht detektierbare metallische Bauteile aus Titan, Stahl, Kupfer und verschiedenen Aluminiumlegierungen mit kleineren Anhaftungen vor Ort zu trennen und in verschiedene verschließbare Containersysteme zwischenzulagern. Im Bereich der Altflugzeugstruktur kann auch eine entsprechende Vorsortierung des Rumpfes und der Flügel erfolgen. Als chargierfähig gelten vorzerkleinerte Materialstücke mit max. Abmessungen von 50 cm*50 cm*150 cm.

Vorzerkleinerung eines Altflugzeugs ohne Vorsortierung der Aluminiumlegierungen:

Bei dem Rückbau eines Altflugzeugs fallen im Wesentlichen zwei Hauptlegierungsgruppen an, vgl. Kapitel 5.2. Das sind zum einen die 2XXX-Legierungen aus dem Rumpf und zum anderen die 7XXX-Legierungen aus dem Flügel. Im Falle einer Vermischung der beiden hauptsächlich verwendeten Al-Legierungen könnte der potenzielle Materialstrom aus Altflugzeugen folgendermaßen aussehen:

Tabelle 31: Potenzielle Altflugzeug-Aluminiumlegierungen ohne Vorsortierung [75]

Legierung	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Sonstige
2XXX+7XXX	≈ 92	3,0	0,4	1,8	0,4	0,4	3,0	3,0

Vorzerkleinerung eines Altflugzeugs mit Vorsortierung:

Über eine mechanische Vorsortierung von dem Rumpf mit hauptsächlich verwendeten 2XXX-Legierungen und den Flügeln mit hauptsächlich verwendeten 7XXX-Legierungen können folgende potenzielle Al-Materialströme aus einem Altflugzeug selektiert werden:

Tabelle 32: Potenzielle Altflugzeug-Aluminiumlegierungen über eine Vorsortierung von Rumpf und Flügel [75]

Legierung	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Sonstige
2XXX	≈ 93	4,4	0,5	1,0	0,7	0,5	0,1	0,2
7XXX	≈ 90	2,0	0,4	2,5	0,2	0,2	6,0	0,2

10.2 Stand der Technik in der Aufbereitung von Altflugzeugen

Gemäß dem dargestellten vorbereitenden Behandlungsprozess werden in diesem Abschnitt die Prozessschritte 6. Vorzerkleinerung und 7. Aufbereitungstechnologien genauer beschrieben. Derzeit werden die Altflugzeuge nach der Vorzerkleinerung auf der Rückbaufläche über mechanische Behandlungsverfahren in mehreren Stufen in der Aufbereitungsanlage vorzerkleinert. Die Prozessstufen können in diesen Anlagen über Schrottscheren, wie z. B. eine Guillotineschere oder hydraulisch angetriebene Alligatorscheren, durchgeführt werden. Dieser Schritt ist z. B. für den vorzerkleinerten Flügel-Mittel-Kasten des Flugzeugs unumgänglich, da die Materialstärken zu groß sind und das Bauteil von der geometrischen Form ungünstig für Großshredderanlagen, Kondiratoren oder Zerdiratoren ist. Dadurch können Schäden an den Anbauteilen, wie z. B. Treibrolle oder den Ambossen an den Großaggregaten verursacht werden. Das

so vorzerkleinerte Material wird, wenn es weiter aufgeschossen werden muss, einer Shredderanlage zugeführt. Dies kann analog zu den bestehenden Systemen der Altfahrzeugverwertung betrachtet werden. In Abbildung 70 wird die Aufbereitung auf Basis der absetzbaren AVV-Nummern eines Altflugzeugs in Anlehnung an die konventionelle KFZ-Aufbereitung dargestellt.

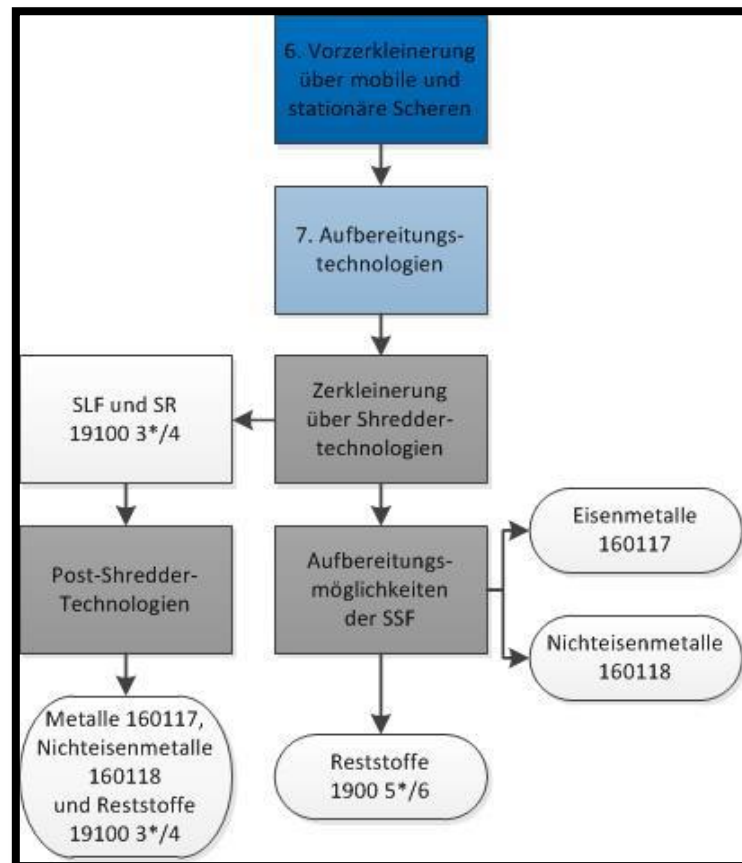


Abbildung 70: Aufbereitungsverfahren für Altflugzeuge in Anlehnung an die konventionelle KFZ-Aufbereitung (eigene Darstellung)

In der Praxis werden unterschiedliche Shreddertechnologien verwendet. Der eigentliche Zweck dieser Systeme dient nicht nur der weiteren Zerkleinerung von nicht direkt in metallurgischen Prozessen einsetzbaren Problemschrotten (aus verschiedenen Verbundmaterialien), sondern auch der Trennung der folgenden Fraktionen:

- die flugfähige Shredderleichtfraktion (SLF), abgetrennt durch eine nachgeschaltete Windsichtung hinter dem Zerkleinerungsaggregat,
- die nicht-flugfähige Shredderschwerfraktion (SSF)
- und die in Stahlwerken einsetzbare Stahlschrottfraction (Shredderschrott).

Die Unterschiede der eingesetzten Shreddersysteme werden in der Tabelle 33 vorgestellt.

Tabelle 33: Unterschiedliche Shreddertechnologien [123]

Aggregat	Großshredder	Kondiratoren	Zerdiratoren	Mühlen
Leistung	bis 11.000 PS	1.200-4.800 PS	800-6.400 PS	bis 800 PS
Auswurf	Oberrost	seitlich liegendes Rost	Oben und unten liegendes Rost	
Besonderheit		Separate Austrittsöffnung für sperrige Bauteile	Materialauswurf aus dem Rotorraum wurde verändert	Maschinen für kleineren Durchsatz
Schrottart	Schwerschrott	Mittelschwerer Mischschrott	Leichtschrott	Leichtschrott

Spezialformen von Shreddern, wie z. B. Nassshredder, Seminassshredder (Staubbindung) und Querstromzerspaner, kommen für die zu lösende Aufgabe nicht in Betracht.

In Deutschland besteht ein ausreichend engmaschiges Netzwerk an diesen Aggregaten, die für einen groben Aufschluss nach der Vorzerkleinerung des Altflugzeugs auf der Rückbaufläche genutzt werden können, vgl. Abbildung 71.

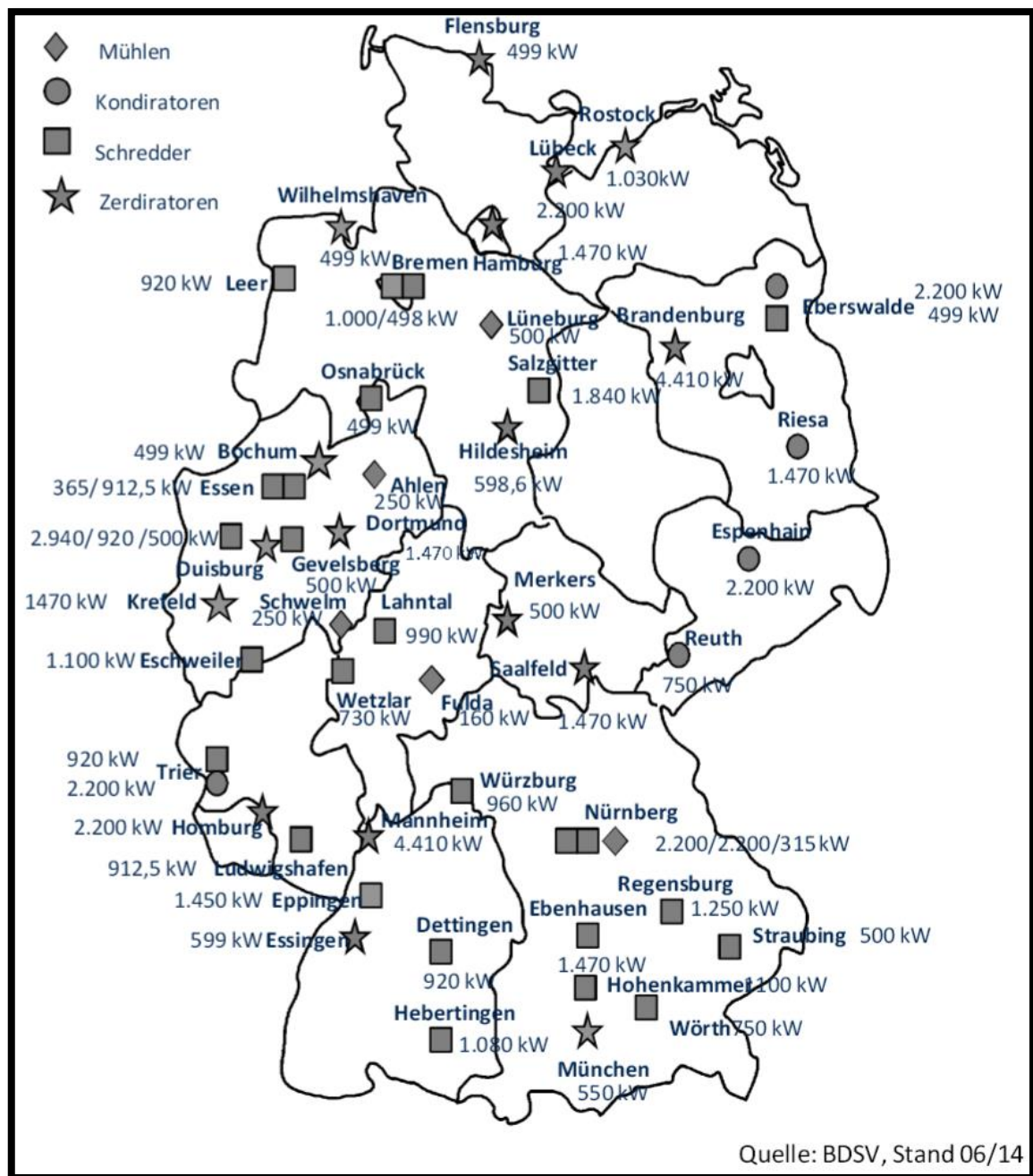


Abbildung 71: Shredderanlagen in Deutschland [124]

Im Folgenden wird das allgemeine Funktionsprinzip einer Shredderanlage beschrieben. Die erste Stufe einer Shredderanlage ist der Hammerbrecher mit einer entsprechend dimensionierten Einzugswalze. Das Aufgabematerial wird über einen großen Energieeintrag, der über die Hämmer auf das Material übertragen wird, aufgeschlossen. Die zweite Stufe ist die integrierte Absauganlage, die die SLF aus dem Innenraum des Aggregats absaugt. Der Absaugung ist ein Abscheidezyklon und eine Abluftreinigung nachgeschaltet. Das schwere, nicht flugfähige Material wird über ein Austrags- und Transportband

einem Magnetscheider zugeführt. Hier erfolgt die Trennung in die magnetische Stahlschrottfraktion und die unmagnetische, NE-metallreiche SSF [125]. In Bezug auf das Aufgabematerial Altflugzeug sind in der SSF die Aluminiumlegierungen, Stahl, Kupfer und das Titan enthalten. Bevor dieser Materialstrom weiter sortiert werden kann, erfolgt eine Siebung der SSF, um definierte weiterverarbeitbare Fraktionen (z. B. $> 100 \text{ mm}$, $10 - 100 \text{ mm}$ und $< 10 \text{ mm}$) zu erhalten. Die Fraktion über 100 mm wird einer Handklaubung bzw. Rückführung zum Shredder zugeführt. Die Fraktion unter 10 mm wird einer separaten Feinkornsartierung zugeführt.

Im Rahmen dieser Arbeit wird als Schwerpunkt die Aufbereitung der mittleren Fraktion betrachtet. In der nächsten Prozessstufe, nach einem ausreichenden Aufschluss und der Siebung des Materials kann eine Sortierung über Wirbelstromscheider von Metallen und Nichtmetallen durchgeführt werden. Hinter größeren Shreddern mit einem hohen Materialdurchsatz haben sich die Wirbelstromscheider mittlerweile als Stand der Technik durchgesetzt. In der nächsten Stufe kann eine weitere Sortierung der Leicht- und Schwermetalle oder auch verschiedener Leichtmetalle nach Legierungsgruppen erfolgen. Dazu wird im Allgemeinen eine Sortierung nachgeschaltet, die über den Dichteunterschied Materialien, beispielsweise über einen Trommelscheider, in Dichtetrüben voneinander trennt (z. B. eine zweistufige Sink-Schwimm-Scheidung).

Über dieses Verfahren können Trennschnitte von $1,7$ bzw. $2,7 \text{ g/cm}^3$ gelegt werden. So lassen sich beispielsweise:

kleiner als $1,7 \text{ g/cm}^3$ Magnesium,

$1,7-2,7 \text{ g/cm}^3$ Aluminium und

größer als $2,7 \text{ g/cm}^3$ eine Mischung aus Edelstahl, Messing, Kupfer und Zink voneinander trennen.

In der finalen Aufbereitungsstufe kann die Schwermetall-Mischfraktion über eine sensorgestützte Sortierung weiter aufgetrennt werden.

Der Anreiz, Sekundäraluminium in der Industrie einzusetzen, liegt maßgeblich in der Energiereduzierung und in den daraus resultierenden monetären Einsparungen im Gegensatz zur Primärproduktion. Für die Primärherstellung von Aluminium aus Bauxit werden 163.670 MJ/t benötigt, für die Herstellung von

Aluminium aus Schrotten dagegen nur 19.505 MJ/t [126]. Durch das Bereitstellen von Sekundärrohstoffen können der aluminiumverarbeitenden Industrie erhebliche Mengen von Vorstoffen zur Verfügung gestellt werden, vgl. [73].

Die Verarbeitung von Knetlegierungsschrotten zu Vormaterialien für die Herstellung von Halbzeugen, d.h. zu Walz- und Pressbarren, erfolgt heute zunehmend in den Umschmelzwerken durch sogenannte Remelter. Für eine zuverlässige kontinuierliche Kundenbelieferung mit Sekundärrohstoffen aus dem Al-Legierungsbereich ist aber in der Regel eine Getrenntsammlung nötig. Hintergrund ist, dass derzeit noch kein Aufbereiter die mechanische bzw. die metallurgische Trennung verschiedener Legierungen im Industriemaßstab beherrscht.

Die Verarbeitung von Gussschrotten und stärker verunreinigten Vorstoffen zu hochwertigen Gusslegierungen erfolgt in den Schmelzhütten durch sogenannte Refiner, vgl. [73]. Die Refiner haben größere Möglichkeiten den geschaffenen Sekundärrohstoff aus den Altflugzeugen zu gattieren und verdünnt in ihrer Produktionslinie einzusetzen. Der Großteil der Schrotte wird derzeit in sogenannten Salz-Drehtrommelöfen aufbereitet. Es lassen sich aber im pyrometallurgischen Prozess Legierungselemente, die edler als das Aluminium sind (beinhaltet fast alle Legierungselemente), nicht aus der Legierung entfernen. Resultierend daraus lassen sich dann auch nur Gussqualitäten mit bestimmten geringeren Qualitäten herstellen, die z. B. in der Luftfahrttechnik aufgrund der hohen Qualitätsstandards nicht zugelassen werden können. Ein anerkannter Qualitätsmaßstab der verschiedenen Aluminiumschrotte ist die DIN EN 13920 [127], die im folgenden Abschnitt vorgestellt wird.

10.3 Qualitätsmaßstab auf Basis der DIN EN 13920 und der Einsatz in Schmelzöfen

Für die produzierende Industrie der Aluminiumlegierungshersteller ist als Qualitätsmaß die DIN EN 13920 - 1 bis 13920 - 16:2003 - 08 ausschlaggebend. In dieser Norm unterteilen sich Aluminiumschrotte in die folgenden 15 verschiedenen Schrottsorten:

- EN 13920 Teil 2: Schrott aus unlegiertem Aluminium
- **EN 13920 Teil 3: Draht- und Kabelschrott**
- **EN 13920 Teil 4; Schrott aus einer einzigen Knetlegierung**
- **EN 13920 Teil 5: Schrott aus zwei oder mehr Knetlegierungen der gleichen Legierungsserie**
- **EN 13920 Teil 6: Schrott aus zwei oder mehr Knetlegierungen**
- EN 13920 Teil 7: Schrott aus Gussstücken
- **EN 13920 Teil 8: Schrott aus Nichteisenmaterialien vom Shreddern für Aluminiumseparationsverfahren**
- **EN 13920 Teil 9: Schrott aus Aluminiumseparationsverfahren von geschredderten Nichteisenmaterialien**
- EN 13920 Teil 10: Schrott aus gebrauchten Aluminium-Getränkedosen
- EN 13920 Teil 11: Schrott aus Aluminium-Kupfer-Kühlern
- EN 13920 Teil 12: Späne aus einer einzigen Legierung
- EN 13920 Teil 13: Gemischte Späne aus zwei oder mehr Legierungen
- EN 13920 Teil 14: Schrott aus gebrauchten Aluminiumverpackungen
- EN 13920 Teil 15: Von Beschichtung befreiter Aluminiumschrott aus gebrauchten Aluminiumverpackungen
- EN 13920 Teil 16: Schrott aus Krätzen, Ausläufern und Gröben

Die fettgedruckten Kapitel sind aus Sicht des Altflugzeugrecyclings wichtig. In der folgenden Tabelle 35 sind die entsprechenden chemischen Zusammensetzungen aufgezeigt. Wenn diese Werte mit der Tabelle 34 verglichen werden, ist erkennbar, dass die chemische Zusammensetzung der verwendeten Legierungen durch die hohen Kupfer-, Magnesium- und Zinkgehalte, je nach Anwendungsfall, ein Problem für die Annahme der angelieferten Massenschrotte in den Schmelzwerken (Refiner und Remelter) darstellen können. Diese Grenzwerte sind in Tabelle 35 mit „Rot“ kenntlich gemacht worden.

Tabelle 34: Zusammenfassung der verwendeten Legierungen in Flugzeugen

Legierung	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Sonstige
2XXX+7XXX	≈ 92	3,0	0,4	1,8	0,4	0,4	3,0	3,0
2XXX	≈ 93	4,4	0,5	1,0	0,7	0,5	0,1	0,2

Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aus der Sekundärrohstoffgewinnung der letzten durchgeführten Rückbauprojekte von Altflugzeugen und den gewählten Absatzrouten die durchgeführte Vorsortierung am Rückbaustandort keinen monetären Vorteil gebracht hat. Das Material konnte bei der derzeit durchgeführten Trennung und den geringen anzubietenden Mengen lediglich als vorzerkleinertes sogenanntes Alu-Geschirr abgesetzt werden. Es besteht derzeit letztlich die Möglichkeit, das Material auf den folgenden zwei Absatzwegen abzusetzen: als gemischtes Material auf Basis von Alu-Zorba (70 - 80 % Al-Inhalt) oder als Alu-Geschirr mit relativ geringen Qualitätsanforderungen (min. 90 % Al-Inhalt).

Tabelle 35: Auszug der chemischen Zusammensetzung von Al-Legierungen nach DIN EN 13920

Schrottsorten	Draht- und Kabelschrott		Schrott aus einer einzigigen Knetlegierung	Schrott aus zwei oder mehr Knetlegierungen der gleichen Legierungsreihe								Schrott aus zwei oder mehr Knetlegierungen		Schrott aus Gussstücken	Schrott aus Nichteisen-materialien vom Shreddern für Aluminium- separations- verfahren	Schrott aus Aluminium- separations- verfahren von geshredderten Nichteisenmaterialien	
	DIN-EN		DIN-EN	DIN-EN								DIN-EN		DIN-EN	DIN-EN	DIN-EN	
Hyperlink	13920-3:2003		13920-4:2003	13920-5:2003								13920-6:2003		13920-7:2003	13920-8:2003	13920-9:2003	
chemische Zusammensetzung	Chemische Zusammen- setzung von Draht- und Kabelschrott aus unlegiertem Aluminium	Chemische Zusammen- setzung von Draht- und Kabelschrott aus Aluminium- legierungen der 6XXX Serie	Schrott muss die Zusammen- setzung einer Knetlegierung nach 573-3 erfüllen	Grundlage für Mehrzweck- verwendung	Grundlage für Legierungen der Serie 2XXX	Grundlage für Legierungen der Serie 3XXX	Grundlage für Legierungen der Serie 5XXX, niedriger Magnesiumanteil	Grundlage für Legierungen der Serie 5XXX, hoher Magnesiumanteil	Grundlage für Legierungen der Serie 6XXX	Grundlage für Legierungen der Serie 7XXX, mit Chrom	Grundlage für Legierungen der Serie 7XXX, mit Zirkon	chemische Zusammensetzung der Stufe A	chemische Zusammensetzung der Stufe B	Chemische Zusammensetzung	Chemische Zusammensetzung	Chemische Zusammensetzung	
	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Verweise	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %	Massenanteil in %
	Al min.	99,5	97,98	1XXX	96,4	94,3	95,6	95,4	91,9 - 95,4	97,45	88,55	88,5	95,5	92,25	79	83,3	83,3
	Si max.	0,25	0,6	4XXX	0,7	0,5	0,6	0,3	0,3	0,6	0,4	0,5	1	1,5	13,5	9	9
	Fe max.	0,4	0,3	8XXX	0,7	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,8	1,2	1,1	1,1	1,1
	Cu max.	0,05	0,05	2XXX	0,4	3,5	0,2	0,1	0,1	0,2	1	1	0,8	1	3,5	3,5	3,5
	Mn max.	0,05	0,6	3XXX	0,5	0,7	1,3	0,6	0,6	0,15	0,2	0,2	0,5	1	0,5	0,5	0,5
	Mg max.	0,05	0,05	5XXX	0,6	0,2	1,3	2,5	2,5 - 6	0,5	2,5	2,5	0,6	2	0,3	0,5	0,5
	Zn max.	0,07	0,07	7XXX	0,4	0,25	0,2	0,25	0,25	6,5	6,5	6,5	0,5	0,7	1,2	1,2	1,2
	Ti max.	0,05	0,1	8XXX	0	0	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,15	0,15	0,15
	Cr max.	0	0,05	8XXX	0	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0
	Pb max.	0	0	8XXX	0,1	0	0	0	0,1	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0,2
	Sn max.	0	0	8XXX	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1
	Zr max.	0	0	8XXX	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0
	Ni max.	0	0	8XXX	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0,3
	Pb und Sn max.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	andere einzeln max.	0,03	0,05	DIN-EN-573-3	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0	0,1	0,15	0,15	0,15	0,15
andere gesamt max.	0	0,15	DIN-EN-573-3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Metallausbeute	95%		> 95%	≥ 88%								≥ 88%		≥ 90%	≥ 90%	≥ 90%	

10.4 Beschreibung derzeitiger Absatzwege des aufbereiteten Materiallagers von Altflugzeugen

In den folgenden Abschnitten werden die derzeitigen Aufbereitungs- und Absatzwege für die gewonnenen Sekundärrohstoffe beschrieben. Dies beinhaltet auch die Beschreibung des Problems des Materialabsatzes durch die erwarteten Anlieferqualitäten der Schmelzwerke.

10.4.1 Aluminium

Wie in Kapitel 10.3 beschrieben, lassen sich die Aluminiumlegierungen aus den Altflugzeugen derzeit nur als Mischschrott (Alu-Zorba oder Alu-Geschirr) absetzen. Dies liegt vermutlich an der in diesem Zeitraum erzeugten geringen produzierten Masse aus Al-Schrott. Die Absatzmengen waren für die einzelnen Projekte sehr niedrig. Weiterhin waren die enthaltenen Legierungsbestandteile auf Basis der Analyse der DIN EN 13920 im Bereich Cu und Mg zu hoch. Daher wurde das aufbereitete Material weitestgehend als Refiner-Material zur Herstellung von Gusslegierung verwendet. Dieses Fazit lässt aber auch den Schluss zu, dass im Bereich der Legierungstrennung und der Aufkonzentrierung von verschiedenen Materialgruppen ein erhöhter Forschungsbedarf notwendig ist. Mit einer Optimierung der Trennverfahren könnten dann auch die Remelter mit einer größeren Masse von verschiedenen Schrott-Al-Legierungen beliefert werden. An dieser Stelle darf aber nicht nur die Route der Altflugzeugschrotte betrachtet werden. In diesem Bereich müssen alle Schrotte aus dem Bereich der Post Consumer Anfallstellen (Altschrotte) und Post Industrial Anfallstellen (Neuschrott) einbezogen werden. Auf dieser Basis könnte dann eine Wertsteigerung des Materials erreicht werden, die den erhöhten Detektions- und Sortieraufwand durch eine sensorgestützte Sortierung rechtfertigt.

10.4.2 Stahl- und Superlegierungen

Im Bereich der Altflugzeuge ist der größte Teil des niedriglegierten Stahls im Bereich der Fahrwerke verbaut. Die Fahrwerke haben eine große stabile Konstruktion und müssen nach dem Ausbau und entsprechender Druckentlastung zuerst mit einem Fallwerk vorgebrochen werden, damit sie chargierfähig sind. Weiterhin müssen die enthaltenen Life Limited Parts (LLP) entsprechend nach

Luftrecht dokumentiert unbrauchbar gemacht und die Information an den Kunden geliefert werden, vgl. Kapitel 8.7. Die Fahrwerksmaterialien werden nach entsprechender Vorbehandlung und Detektionsverfahren in den konventionellen metallurgischen Prozess über z. B. Elektro-Stahlwerke oder Oxygen-Stahlwerke eingebracht.

Die hochlegierten Stähle, z. B. Nickelbasis-Superlegierungen, die im Bereich der Hochtemperaturanwendungen im Triebwerksbereich eingesetzt werden, müssten weitergehend auf eine gute Wertschöpfung untersucht werden. Auch hier ist, wie bei den Fahrwerken, bei der Demontage darauf zu achten, dass die LLP entsprechend dokumentiert unbrauchbar gemacht werden, bevor die Materialien in den Sekundärrohstoffmarkt gehen können. Diese dokumentierte Unbrauchbarmachung benötigt relativ viel Zeit, da es eine „Stück für Stück“-Prüfung ist. Bei dem Prozess wird ein mobiler RFA-Analysator empfohlen, um die Materialien entsprechend für die jeweilige Materialroute zu sortieren und abzusetzen.

Diese Materialien können dann über verschiedene Wege eingeschmolzen werden. Zum einen offen im Lichtbogenofen als Auflegierungsbestandteil für die Schmelze. Zum anderen kann auch ein Induktionsschmelzofen offen oder im Vakuum genutzt werden. Wenn der Einsatz für die Vakuumschmelze gewählt wird, ist derzeit nur die vorgeschaltete Trennmöglichkeit über eine manuelle Handklaubung durchführbar. Für die Ausgangsanalyse werden stationäre Analysegeräte eingesetzt, die neben den Hauptlegierungselementen (Eisen, Chrom, Nickel, Molybdän usw.) auch die kritischen Nebenelemente erfassen (z. B. Sauerstoff, Phosphor, Schwefel usw.).

Bei der „Stück für Stück“-Sortierung ist derzeit auch ein erwähnenswerter Ansatz für die Forschung mit entsprechenden, unterstützenden, sensor-gestützten Sortierungen vorhanden. Im Rahmen der durchgeführten Projekte wurden keine Triebwerke mit den Altflugzeugen veräußert, die tiefergehende Untersuchungen zulassen. An dieser Stelle wird empfohlen, die Forschung zum End-of-Life-Management von Triebwerken fortzuführen.

10.4.3 Titan

Der Umgang mit Titanlegierungen aus dem Schrottbereich ist ein komplexer Vorgang, der eine Menge Erfahrung und ein gutes Labor für die Analytik benötigt. Auf Basis der im Markt anerkannten amerikanischen Standardisierungsorganisation ASTM International werden die Titanlegierungen mit Grade 1 bis Grade 35 beschrieben. Grade 1-4 ist z. B. unlegiertes Reintitan. Die weitverbreitete Grade 5 Titanlegierung, auch Ti-6-4 genannt, enthält 6 % Aluminium, 4 % Vanadium und Rest Titan.

Bei der Detektion von Titan wird ein mobiles Funkenspektroskop empfohlen, um die Bandbreite der Elemente abzudecken. Im Bereich der Detektion von Titanlegierungen sind die Geräte wirtschaftlicher, durch schnellere Messergebnisse, als die RFA-Analysatoren. Weiterhin werden, wie bei den Superlegierungen, stationäre Labormessgeräte für den Sauerstoff-, Schwefel-, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalt benötigt, um das Material den entsprechenden Reinheitsgraden zuordnen zu können.

Als erster Schritt der Sortierung wird der sogenannte Raffschrott (Umarbeitungsmaterial für Ferro-Titan z. B. als Auflegierung für das Edeltahlschmelzwerk) von den potenziellen Separatverkäufen durch eine entsprechende Handklaubung getrennt. Das selektierte Material für die Separatverkäufe, die auch eine wesentlich höhere Wertschöpfung haben, wird aufwendig selektiert 100 % „Stück für Stück“-Sortierung über Handklaubung). Bestandteil des Sortierprozesses ist eine entsprechende Endkontrolle auf Kontaminationen mit Fremdmaterialien, wie z. B. Hartmetall, Edelstahl, Eisen usw.. Die Endkontrolle ist notwendig, da die Kontaminationen auch während des Aufbereitungsprozesses beim Aufbereiter entstehen können. Beispielsweise würde mit-geschlepptes Hartmetall im EB-Ofen (Elektronenstrahl-Ofen) nicht aufschmelzen und dadurch als Einschluss das fertiggestellte Produkt verunreinigen. Dieses kann sehr kostenintensiv sein und muss unbedingt mit entsprechenden Endkontrollen verhindert werden. Auch in diesem Bereich der Titanlegierungstrennung durch Handklaubung besteht noch ein erhöhter Forschungsbedarf, z. B. durch den Einsatz unterstützender sensorgestützter, automatisierte Maschinen, die Prüfzeiten verkürzen zu können.

10.4.4 Kohlefaserverbundwerkstoffe

Im Bereich der Leichtbauverbundbauweise ist im Jahr 2011 mit dem Dreamliner (Boeing 787) ein Leichtbaumaterial-Meilenstein in die Produktion gegangen. Die Primärstruktur einschließlich des Rumpfs und der Flügel besteht zu 50 % aus Verbundwerkstoff [128]. Der Aluminiumanteil liegt bei diesem Flugzeug nur noch bei 20 %, vgl. Abbildung 1 (S. 2). Das bedeutet, dass sich die Demontage- und Verwertungsunternehmen für die Zukunft auf neue Materialströme der Verbundstoffe und Aufbereitungstechnologien im Altflugzeugbereich einstellen müssen. Dabei werden thermische Zersetzungsverfahren, wie z. B. das eingesetzte Niedertemperatur-Pyrolyse-Verfahren, für die Rückgewinnung der Kohlefaser aus CFK eingesetzt. Einen ersten industriellen Ansatz in diesem Bereich hat die Firma CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG der Karl Meyer Gruppe umgesetzt. Weiterhin forschen Boeing in Kooperation mit der University of Nottingham, die TU Clausthal, Volkswagen und BMW an diesem Thema der Aufbereitungsmöglichkeiten.

10.5 Verfahrenstechnische Perspektiven in der Aufbereitung

Nach den beschriebenen konventionellen mechanischen Aufbereitungsprozessen können in der industriellen Praxis auch innovative Verfahren zur Trennung von Guss- und Knetlegierung mit thermischer Unterstützung eingesetzt werden, wie z. B. der Hot-Crush-Prozess. Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften der verwendeten Guss- und Knetlegierungen kann durch eine gezielte Versprödung von Gusslegierungen gegenüber Knetlegierungen in einem ganz bestimmten Temperaturbereich eine sehr gute selektive Trennung der verschiedenen Materialien erreicht werden. Nach Erhitzung des Materials auf eine Temperatur kurz unter dem Schmelzpunkt der Gusslegierungen (ca. 540 - 580°C) wird das Material über eine entsprechende Brecheranlage (z. B. Hammer- oder Prallmühle) gefahren. Während die Gusslegierungen sprödebruchbedingt deutlich zerkleinert werden, wird der Anteil der Knetlegierungen während des Prozesses nur plastisch verformt. Durch diesen Prozessschritt resultiert eine unterschiedliche Kornverteilung des Materials. Diese Eigenschaft kann genutzt werden, um durch Sieben eine Trennung der einzelnen Bestandteile zu erreichen. Nach dem die Guss- und Knetlegierungen voneinander

selektiert worden sind, gibt es im Bereich der Knetlegierung weitere Möglichkeiten, Trennungen verschiedener Legierungsgruppen vorzunehmen.

Hier sind derzeit verschiedene Verfahrensansätze mit sensorgestützten Sortierungssystemen in der Entwicklung. Besonders erfolgversprechend scheinen Ansätze zur Sortierung mittels Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) zu sein. Hierbei wird mittels einem gepulsten Laserstrahl ein Atomemissionsspektrum erzeugt und als Sortiergrundlage verwendet. Die vorbereiteten zerkleinerten Materialien können so auf ihre Zusammensetzung detektiert und in verschiedene Fraktionen sortiert werden. Der Lehrstuhl für Lasertechnik (LLT) der RWTH Aachen in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT) legt derzeit einen Forschungsschwerpunkt auf dieses System. Dieses System hat aber den Nachteil, dass die beschossenen Schrottteile bei der Erkennung und dem anschließenden Beschuss des Lasers an der gleichen Position (X-, Y-, und Z-Achse) liegen müssen. Diese Anforderung wird durch die Geometrie der Bauteile und durch die beschriebenen Vorzerkleinerungsprozesse beeinflusst. Die Massenströme aus der Aufbereitung und anschließenden Aufkonzentrierung des Materials sind meist stark gestaucht, enthalten mehrere Materialien durch die Verkugelung und liegen selten plan auf dem Förderband. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die Bauteile durch Beschichtungen (z. B. Eloxat oder Lack) gegen äußere Einflüsse geschützt worden sind. Dies kann die Messwerte an den Beschussstellen stark verfälschen.

Ein neu vorgestelltes Verfahren im Bereich der Erkennung und Sortierung kombiniert drei Separationsschritte nach dem konventionellen beschriebenen Aufbereitungsprozess (Vorzerkleinerung, Siebung, Wirbelstromscheidung und Dichtentrennung). Es werden eine doppelte Röntgentransmission (XRT)-Sortierung oder eine Röntgentransmission (XRT)-Sortierung und eine Röntgenfluoreszenz (XRF)-Sortierung eingesetzt. Über diese Kombination ist es möglich, verschiedene Aluminiumlegierungen zu trennen, vgl. [129]. Dieses Verfahren konnte auch versuchsweise mit beschichteten Alu-Legierungen, wie z. B. bei dem Recycling von Fensterrahmen, erfolgreich eingesetzt werden.

11 Darstellung des potenziellen weltweiten Materiallagers von Altflugzeugen

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die umweltrechtliche und die technische Umsetzbarkeit des Altflugzeugrecyclings vorgestellt. Im folgenden Kapitel wird das derzeitige weltweite Materiallagerpotenzial von Flugzeugen beschrieben. Des Weiteren erfolgt eine monetäre Bewertung des Materiallagers sowie eines Altflugzeuges.

11.1 Anfallstellen von Altflugzeugen

Für die Betrachtung der einzelnen Materiallager/Materialverbunde Altflugzeug sind neben den weltweit vorhandenen Parkplätzen in den ariden Flächengebieten auch die genutzten Parkflächen an Verkehrsflughäfen zu betrachten. Die Materiallager sind örtlich endlich, da nur eine definierte Menge an den Standorten zur Verfügung steht, daher auch der vorgestellte dezentrale Ansatz in Kapitel 9. Es ist schwer abzuschätzen, wie viele Flugzeuge tatsächlich bereits außer Dienst genommen sind, da in der Regel in der Zeit des Prolonged Parkings oder Storage an diesen Parkplätzen keine Abmeldung stattfindet. Stattdessen wird die Lufttüchtigkeit erhalten, um Reglementierungen zur Wiedenzulassung und wirtschaftliche Nachteile durch die Abmeldung zu umgehen. Wie die vorangestellte Tabelle 27 (Kapitel 9, S.134) zeigt, können sehr schnell hohe Kosten durch einen Ferry Flight und das Parken entstehen. Gründe, um Flugzeuge kurzfristig parken zu müssen, können betriebswirtschaftlich sein, wie z. B. die kurzfristige fehlende Nachfrage nach Transportkapazitäten im Luftfahrtbereich. In Abbildung 72 ist erkennbar, dass im betrachteten Zeitraum zwischen 1983 - 2013 Peaks auftauchen, an denen die Anzahl geparkter Flugzeuge außerordentlich hoch ist. Die Abbildung zeigt den Ein- und den Ausgang der weltweit geparkten Flugzeuge. Wenn sich die Darstellung im negativen Bereich befindet, sind mehr A/C aus dem Parkmodus herausgegangen als hinein geparkt wurden. Das Potenzial der 6.707 inaktiven Flugzeuge, die weltweit geparkt sind, wird in Abbildung 73 dargestellt.

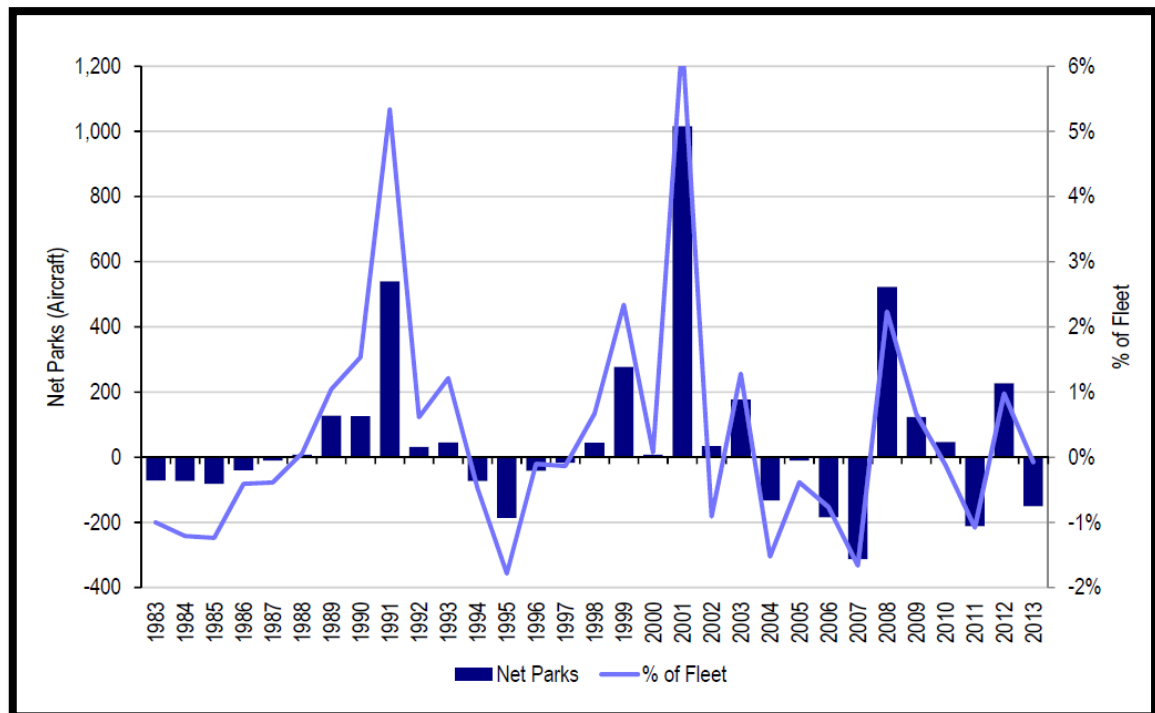


Abbildung 72: Ein- und Ausgang der geparkten Flugzeuge an Flughäfen [130]

Diese kurzfristigen Nachfragen zum Parken hängen mit weltweiten geschichtlichen und wirtschaftlichen Ereignissen zusammen. Zum Beispiel könnte in den Jahren 1990 - 1991 die hohe Anzahl der geparkten Flugzeuge durch die Entwicklung des Irakkriegs (erwartete Ölkrise) verursacht worden sein. Am 11. September 2001 (9/11) wurde der Terroranschlag auf das World Trade Center in New York, USA, verübt. Dieses Ereignis hat massive Auswirkungen auf die Luftfahrt und die Sicherheitsbestimmungen gehabt. Im September 2008 erreichte die Finanzkrise mit dem Zusammenbruch der Bank Lehmann Brothers ihren Höhepunkt. Möglichkeiten, Flugzeuge zu parken, bieten sich vorzugsweise in ariden Gebieten, wie z. B. über die Firma Marana Aerospace Solutions [92] in Arizona, USA, oder die Firma TARMAC AEROSAVE [131] in Teruel, Spanien, an.

Die Darstellung des potenziellen Materiallagers wird im Folgenden auf Basis einer Recherche durch das IFAD (Institut für Aufbereitung und Deponietechnik) der TU Clausthal und Veröffentlichungen von Airbus und Boeing dargestellt.

11.2 Darstellung des Materiallagers mit einem gemittelten Massebezug von Altflugzeugen

Am IFAD der TU Clausthal wurde eine quantitative Erfassung nicht mehr flugtüchtiger Flugzeuge nach Muster und Hersteller angefertigt. Grundlage der Studie war die Erstellung einer Auflistung der 36 größten Flugmuster nach Hersteller, Baujahr, Anzahl der hergestellten Modelle, Anzahl der aktiven Modelle und der Dimensionen, wie Leergewicht und Abmaße der untersuchten Flugzeuge. Die ausgefertigte Tabelle ist in Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster, zu finden.

Es wurden ca. 30.000 hergestellte Flugzeuge (über 9 t Leergewicht, Stand September 2012) identifiziert. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass ca. 24.000 aktive Flugzeuge im weltweiten kommerziellen Betrieb sind. Daher ergibt sich, dass ca. 20 % der Altflugzeugflotte inaktiv sind. Diese Zahl setzt sich zusammen aus luftfahrttüchtig geparkten und luftfahrtuntüchtig geparkten Flugzeugen. Vergleicht man dies mit den Zahlen von Boeing, dass zu jeder erdenklichen Zeit mind. 6.000 aktive Flugzeuge in der Luft sind, ergibt sich ein interessanter Wert. Für jedes aktive Flugzeug in der Luft ist ein Flugzeug auf der Welt, bevorzugt in ariden Gebieten, geparkt, siehe Abbildung 73. Nach Auswertung der bereits angeführten Quellen mit aktuellen Zahlen und den Ergebnissen der Forschung des IFAD [43] wird davon ausgegangen, dass in den nächsten 15 Jahren insgesamt etwa 6.500 Altflugzeuge außer Dienst gestellt werden. Das bedeutet, dass im Mittel im genannten Zeitraum 430 Altflugzeuge pro Jahr anfallen werden und dem Recycling somit zur Verfügung stehen. Wenn dies auf ein mittleres Leergewicht der 36 größten Flugmuster mit 70,2 t [9] bezogen wird, steht ein theoretisches Materiallager von etwa 456.300 t in den nächsten 15 Jahren zur Verfügung, siehe Abbildung 74.

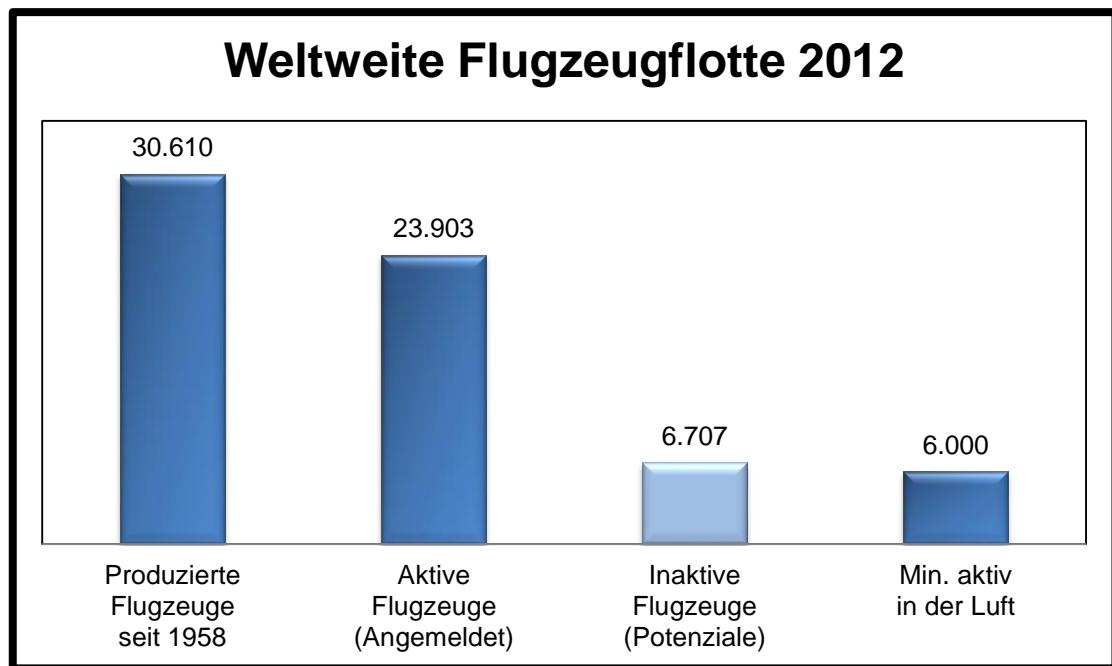


Abbildung 73: Lokalisierte Flugzeuge weltweit (eigene Darstellung)

Basierend auf den Ergebnissen des Forschungsprojektes PAMELA und auf Grundlage der selbst durchgeführten Untersuchungen können ca. 60 % des Materials in die stoffliche Verwertung gehen, womit etwa 274.000 t stofflich verwertbare Schrotte identifiziert werden können. Bei einer mittleren Materialzusammensetzung von 77 Ma.- % Aluminium, 12 Ma.- % Stahl, 4 Ma.- % Titan, 4 Ma.- % Verbundmaterial und 3 Ma.- % sonstige Materialien ergeben sich entsprechend nutzbare Anteile an Rückgewinnungspotenzialen. Die verbleibenden 40 Prozent des Materiallagers mit ca. 182.300 t eines Altflugzeugs setzen sich aus wiederzuverwendenden, runderneuerbaren Komponenten (Refurbishable Components), wie z. B. Turbinen, Fahrwerke, Avionik und Baugruppen aus dem Interieur-Bereich (13 %), sowie Betriebsflüssigkeiten (15 %) und nicht recycelbaren Materialien zusammen (ca. 12 %), vgl. Abbildung 74. In Summe liegt damit die potenziell erreichbare Quote für Wiederverwendung / Recycling eines Altflugzeugs bei ca. 73 %.

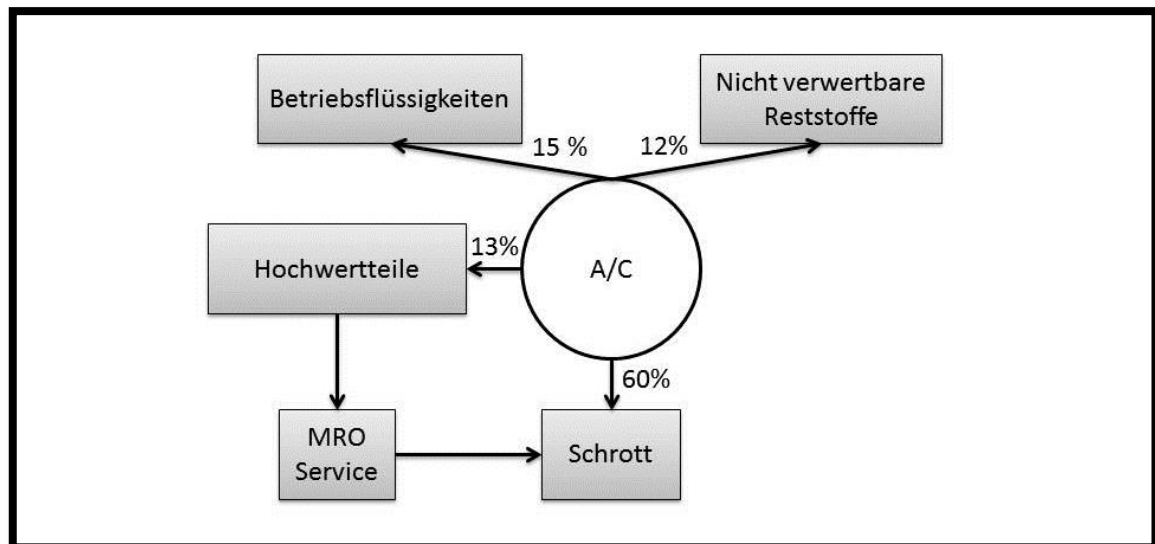


Abbildung 74: Massendarstellung Flugzeug und Anfallstellen Part 145 MRO-Werkstätten (eigene Darstellung)

Die Anfallstellen dieser Komponenten sind in der Regel zertifizierte Part 145 MRO-Werkstätten. In diesen Werkstätten werden lebensdauerbegrenzte Bauteile (LLP=Life Limited Part) runderneuert und haben dadurch wieder 100 % der Laufstunden, wie ein vergleichbares neues Bauteil. Des Weiteren fallen in den MRO-Werkstätten Betriebsstoffe und Materialien zur Beseitigung an. Das sind z. B. diverse Betriebsflüssigkeiten, radioaktive Komponenten (z. B. Rauchmelder Ra 226, Flugzeugtragfläche U 238 abgereichertes Uran oder Flugzeugtriebwerk Th 232 und U 238 [132]), pyrotechnische Sätze (wie z. B. Rettungsmittel) oder kanzerogene Isolierungen. Beispielhaft für den Schrottanfall in MRO-Werkstätten kann der Triebwerkshersteller Pratt & Whitney angeführt werden. Das Unternehmen installierte ein internes Revert Management Programm. Es wurden seit den letzten drei Jahren 300 t hochwertiges Kreislaufmaterial aus Triebwerken recycelt. Dadurch konnte das Unternehmen 5 Mio. \$ einsparen [133].

Der aktuelle <Global Market Forecast, Future Journeys, 2013 - 2032, Airbus> erwartet mit dieser Veröffentlichung 29.226 Neulieferungen von Flugzeugen und eine Stilllegung von 10.334 Altflugzeugen in den nächsten 19 Jahren [13]. Das würde bedeuten, dass pro Jahr ca. 540 Flugzeuge zur Verfügung stehen würden. Das wären ca. 110 Altflugzeuge pro Jahr, die als zusätzliches Potenzial zu dem dargestellten Materiallager zur Verfügung stünden. Das entspricht einem gesamten Materiallager von ca. 725.000 t. Davon könnten ca. 435.000 t

ohne Rückläufer aus den MRO-Betrieben stofflich verwertet werden. Das potenzielle Wachstum des verwertbaren Materiallagers liegt dann bei ca. 161.000 t. Die Entwicklung der Zahlen zeigt, dass weltweit ein ausreichendes Materiallager in der Nische Altflugzeugrecycling zur Verfügung steht. Der Bereich der Werkstattentsorgung kleinerer privater und militärischer Maschinen wurde in der vorliegenden Dissertationsschrift nicht berücksichtigt und ist als weiteres Potenzial für das dargestellte Materiallager zu sehen.

Im folgenden Kapitel wird das potenzielle Materiallager mit gemittelten Sekundärrohstoffpreisen aus dem Bereich der stofflichen Verwertung unterlegt.

Tabelle 36: Gemitteltes Materiallager Altflugzeuge

	Global Market Forecast 2009-2028	Global Market Forecast 2013-2032	Airplane Recycling Efforts, Benefit Boeing Operators	Projektarbeit TU Clausthal	Mittelwert
Potenzielle außer Dienst gestellte A/C	6.549	10.334	8.500	6.500	
Betrachtete Jahre	19	19	17	15	
Berechnungsgrundlage A/C pro Jahr					
Altflugzeuge pro Jahr	345	544	500	433	455
Mittelwert in t pro A/C	70,2				
Stand 2014, Mittelwert bezogen auf die nächsten 15 Jahre					
Materiallager Gesamt in t	363.285	572.832	526.500	456.300	479.611
27 % MRO Betriebsflüssigkeiten und nicht verwertbare Reststoffe	98.087	154.665	142.155	123.201	129.495
Potenzielles verfügbares Materiallager an Altflugzeugen ohne MRO Output (alle Angaben in t)					
13 % Wieder- und Weiterverwendung	47.227	74.468	68.445	16.016	62.349
60 % stofflich verwertbare Schrotte	217.971	343.699	315.900	273.780	287.767
Davon					
77 % Aluminium	167.838	264.648	243.243	210.811	221.635
12 % Stahl	26.157	41.244	37.908	32.854	34.541
4 % Titan	8.719	13.748	12.636	10.951	11.514
4 % Verbundmaterial	8.719	13.748	12.636	10.951	11.514
3 % sonstige Materialien	6.539	10.311	9.477	8.213	8.635
Quellen	[134]	[13]	[12]	[43]	

11.3 Monetäre Bewertung des Materials auf Basis des zur Verfügung stehenden Materiallagers in einem Altflugzeug

Die Materialbewertung erfolgt auf Grundlage der Gesamtmasse des Altflugzeugs. Von dieser Gesamtmasse können nach Abzug der ausgebauten Hochwertteile, der nicht verwendbaren Materialien und der abgepumpten Flüssigkeiten von einem Passagierflugzeug zurzeit max. 60 % Material des Altflugzeugs als Schrotte ohne Rücklaufmaterial von den MROs recycelt werden. Die mögliche Materialzusammensetzung in einem Altflugzeug wurde bereits beispielhaft in Tabelle 36 dargestellt. Der größte massebezogene Materialanteil bis zu einem Produktionszeitraum von 1990 besteht aus Aluminium, Stahl und Titan.

11.3.1 Aluminiumlegierungen

Die Aluminium-Notierung ist abhängig von der London Metal Exchange (LME). Etwa 25 % des Aluminium-Gestehungspreises sind abhängig vom Preis des Bauxits, aus dem das Aluminium gewonnen wird. Weitere ca. 35 % sind abhängig vom Strompreis, da die Schmelzflusselektrolyse in der Primärherstellung sehr stromintensiv ist [135]. Die Raffinade-Produktion liegt weltweit bei ca. 44 Mio. t / Jahr [136]. In Abbildung 75 ist die volatile Wertentwicklung des Aluminiums von 1989 bis zum Juli 2013 auf Basis der LME in \$ / t dargestellt. Von 1990 - 1993 ist ein starker Preisverfall erkennbar. Die Ursache ist die Grenzöffnung und der Zusammenbruch der UdSSR, da Russland einer der größten Aluminiumhersteller der Welt ist (z. B. Firma Rusal). Zu der Zeit wurden die Lagerhäuser mit sehr großen Beständen gefüllt, und zwar so weit, dass die Lagerkapazitäten zeitweise ausgeschöpft waren. Aluminium ist im Flugzeugbau einer der wichtigsten Werkstoffe. Durch den Terroranschlag 9/11 ging der Preis des Aluminiums 2001/2002 ebenfalls zurück. Ab 2002 stieg der Preis des Aluminiums wieder, hauptsächlich durch die Rohstoffnachfrage aus dem wachsenden Bausektor. Auch Rohstoff Commodities (wirtschaftliche Güter) werden für Finanzinvestoren immer interessanter, was zu verstärkten Investitionen etwa in Hedgefonds führte. Im Jahr 2008 ist erneut ein großer Preisverfall erkennbar, der durch den Zusammenbruch der Bank Lehmann Brothers ausgelöst wurde. Zu dieser Zeit wurden viele Geldanlagen (Funds) aufgelöst, um Liquidität zu generieren. 2009 ging die Kurve wieder nach oben, bedingt durch

die Anreize für die Automobilindustrie, z. B. durch den wachsenden Anteil an Leichtbau. Weiterhin begann die US - Notenbank mit ihrem Anleihen-Kauf-Programm und der Nullzinspolitik am Ende des Jahres 2008 [135].

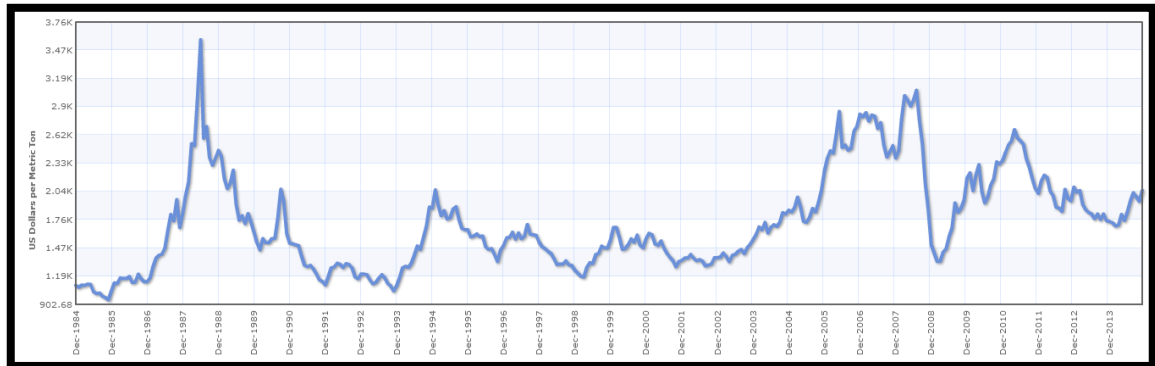


Abbildung 75: Aluminiumpreisentwicklung 1989 - 2014 [137]

Im Rahmen dieser Arbeit wurden 10 Schrottunternehmen angefragt, um den vorsortierten Aluminiumschrott aus den Rückbauprojekten der Altflugzeuge abzunehmen. Es haben sich vier Unternehmen an der Anfrage beteiligt und eine Preis-Indikation für das vorzerkleinerte Material (€/ Tonne) abgegeben, vgl. Tabelle 37. Als Ergebnis der Ausschreibung wurde Firma 2 für die Durchführung eines Pilotprojektes ausgewählt. Das Material wurde im vorliegenden Fall (Menge und Aufbereitungstiefe begrenzt) letztlich als Qualität „Alu-Geschirr“ angenommen. Firma 4 erklärte, grundsätzlich Material aus Altflugzeugen nur als Alu-Geschirr anzunehmen und keine Differenzierungen zu ermöglichen.

Tabelle 37: Preisrechercheergebnisse Aluminium, Stand 21.08.14 [138]

Al als Legierungsgruppe	Anfrage Firma 1 [€/t]	Anfrage Firma 2 [€/t]	Anfrage Firma 3 [€/t]	Anfrage Firma 4 [€/t]
2000er	1.200	1.030	1.000	k.A. .
5000er	1.200	1.430	1.250	k.A.
7000er	1.200	1.030	850	k.A.
Al-gemischt				
Alu-Zorba (min. 70-80 % Al)	900	900	480	k.A.
Alu-Geschirr (min. 90 % Al)	900	1.010	680	1.000

11.3.2 Edelstahl und Superlegierungen

Nichtrostende Stähle (rost-, säure- und hitzebeständige Stähle auch RSH-Stahl genannt) sind als Eisenlegierung mit mind. 10,5 % Chrom definiert [123]. Es werden aber noch weitere Bestandteile, je nach Anforderung des Halbzeugs zulegiert, wie z. B. Nickel und Molybdän. Die Massenschrotte im Edelstahlbereich sind z. B. V2A (X5CrNi18/10, Werkstoffnummer 1.4301) mit durchschnittlich 18 % Chrom und 10 % Nickel und V4A (X6CrNiMo 17/12/12, Werkstoffnummer 1.4571) mit durchschnittlich 17 % Chrom, 12 % Nickel und 2 % Molybdän. Die Legierungsbestandteile Nickel und Chrom werden ebenfalls an der LME gehandelt und der Schrottpreis ist stark abhängig von der volatilen Börse. Die Basis-Nickelpreisdarstellung für die Preisfindung ist in Abbildung 76 dargestellt. Der größte Peak in dieser Kurve ist der Preisanstieg, beginnend im November 2005 von 12.240 \$/t bis zum Mai 2007 mit einer sehr hohen Notierung von 51.780 \$/t und einem anschließendem Preisverfall bis zum Dezember 2008 auf 9.850 \$/t. Dieser Preisverfall wurde durch die Weltwirtschaftskrise verursacht.

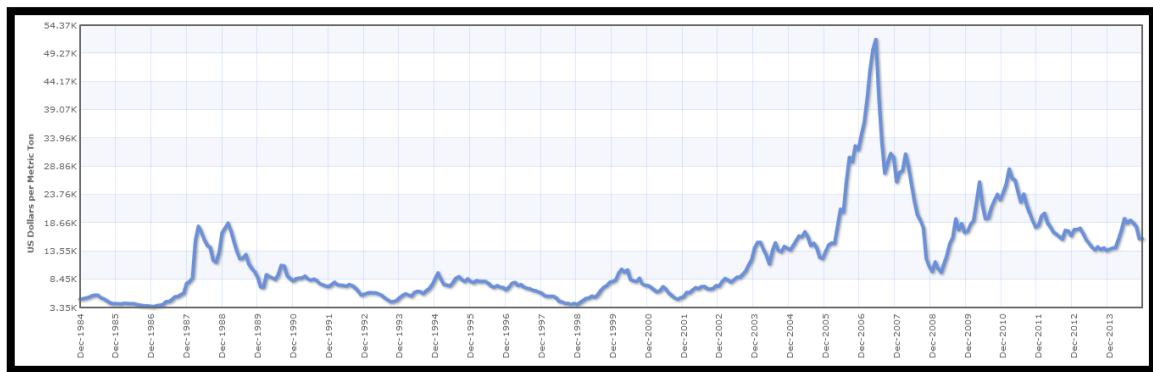


Abbildung 76: Nickelpreisdarstellung 1989 - 2014 [139]

Im Rahmen der beschriebenen Preisabfrage im Aluminiumbereich haben drei Unternehmen auf die zusätzliche Anfrage im Edelstahlbereich reagiert und eine Preisindikation für den Edelstahlschrott abgegeben.

Tabelle 38: Preisrechercheergebnisse Edelstahl, Stand 21.08.14 [138]

Material	Anfrage Firma 1 [€/t]	Anfrage Firma 2 [€/t]	Anfrage Firma 3 [€/t]
V2A	1.200	1.220	1.080
V4A	1.580	1.530	1.400

11.3.3 Titanlegierungen

Reines Titan (Ti) kommt auf der Erde kaum vor. Es wird größtenteils aus den Mineralien Ilmenit und Rutil über den sehr energieaufwendigen Kroll-Prozess (Titan-Schwamm) oder das Van-Arkel-de-Boer-Verfahren (Titan Crystal Bar) im Primärrohstoffbereich gewonnen. Durch viele verschiedene Ti-Legierungen (z. B. Ti6Al4V, mit 6 % Aluminium und 4 % Vanadium oder C. P. mit 99 %+ Ti) in der Halbzeug-Herstellung sind verschiedene Märkte entstanden. Daraus resultieren auch verschiedene Preise für den Sekundärmarkt. Titan ist nicht an Börsen notiert, wodurch der Rohstoff der freien Preisfindung unterliegt. Im Gegensatz zu Aluminium und Nickel ist dieser Markt nicht transparent. Es können aber zwei Zustandsformen zur Preisfindung herangezogen werden. Zum einen die Zustandsform Titan-Schwamm (Sponge). Das Material in dieser Zustandsform wird im Titanofen als Zuschlagstoff verwendet, um Titanhalbzeuge herzustellen. Zum anderen kann das Ferrotitan mit einem Ti-Gehalt von 70 %

herangezogen werden. Dieser Ti-Gehalt ist aber mind. 29 % niedriger als der des Schwamm-Materials. Diese Stoffe werden häufig als Zuschlagstoffe, z. B. in der Stahlindustrie, verwendet. Der Preis für Titanschrott kann z. B. über prozentuale Anteile vom Ferro-Titan-Preis, je nach Qualität, gehandelt werden. Es gibt zur Preisfindung etablierte Online-Plattformen, wie z. B. Metallprices.com.

Im Rahmen der beschriebenen Preisabfrage im Aluminiumbereich haben drei Unternehmen auf die zusätzliche Anfrage im Ti-Bereich reagiert und eine Preisindikation für das Ti aus Altflugzeugen abgegeben.

Tabelle 39: Preisrechercheergebnisse Titan, Stand 21.08.14 [138]

Material	Anfrage Firma 1 [€/t]	Anfrage Firma 2 [€/t]	Anfrage Firma 3 [€/t]
Titan	2.500	2.570	1.000

11.4 Beispielhafte Bewertung anhand eines Altflugzeugs

In der Tabelle 40 wird der monetäre Wert des Materiallagers dargelegt. Die Materialwerte der massenträchtigen Fraktionen Aluminium, Edelstahl, Titan, Sonstige (z. B. Elektronikschrott, Kabel usw.) und die Entsorgungskosten (auf Basis der beschriebenen Preisrecherche von der Keske Entsorgung GmbH zur Verfügung gestellt) beruhen auf den Erfahrungen der durchgeführten Industrie-Projekte im Altflugzeugbereich der letzten Jahre. Es wurden die beiden höchsten Preise gemittelt.

Der Materialwert pro Tonne Altflugzeug kann daher zurzeit mit 995 €/t angenommen werden. Auf Grundlage des recherchierten Mittelwertes des potenziellen verfügbaren Materiallagers (Tabelle 36), mit 455 außer Dienst gestellten Flugzeugen pro Jahr, ergibt sich in den nächsten 15 Jahren ein mittleres Materiallager für die stoffliche Verwertung der Schrotte von 287.767 t. Daraus ergibt sich für die stoffliche Verwertung ein Materialwert von ca. 286 Mio. €.

Zusätzlich stehen die ca. 40 % des Materiallagers mit 191.845 t aus den Part 145 MRO-Betrieben, die über das System der Werkstattentsorgung in die stoff-

liche Verwertung gehen könnten, zur Verfügung. Ein Materialwert für diese Masse / MRO-Teile ist wegen der fehlenden Datenbasis nicht ermittelbar. Ebenso werden das verwertbare Materiallager aus den recyclingfähigen Regional-Jets (unter 9 t) und die Militärmaschinen in dieser Untersuchung nicht betrachtet.

Tabelle 40: Betrachtung des Materiallagers Altflugzeug

Grundlage	Masse in [t]
1 A/C auf 1 Jahr	70,2
Stoffliche Verwertungsmöglichkeit (auf Basis der 60 % stofflichen verwertbaren Schrotte eines Altflugzeugs)	
Fall	Masse in [t]
Projekt 1 A/C (60 % stofflich verwertbar)	42,12
Materialwert ¹ (77 % Al, 12 % Fe, 4 % Ti, 4 % Verbundwerkstoffe und 3 % sonstige Materialien)	
Alu Geschirr	970,00 €/t
Edelstahl Basis V2A	1.166,00 €/t
Titan	2.535,00 €/t
Verbundmaterial (zurzeit energetische Verwertung)	-129,00 €/t
Sonstiges	400,00 €/t
Materialwert pro t Altflugzeug	995 €/t
Materialwert pro gemitteltes Altflugzeug mit 70,2 t	41.909 € ²

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass diese Betrachtung nicht die stoffliche Verwertung der 13 % Masse der Hochwertteile umfasst, da diese typischerweise für den weiteren Einsatz in anderen Flugzeugen beim MRO

¹ Mittelwert: Angebote frei angeliefert und aufbereitet Keske Entsorgung GmbH, Stand April 2014

² Entsorgungskosten der gefährlichen Abfälle und die Kosten der Logistik ausgeschlossen

verbleiben. Erst am Ende ihres Lebenszyklus fallen diese Bauteile im Rahmen der Werkstattentsorgung für die stoffliche Verwertung an.

Im folgenden Kapitel wird der Produktlebenszyklus von Flugzeugen aufgezeigt. Weiterhin werden technische und betriebswirtschaftliche Bewertungsmöglichkeiten von Flugzeugen dargestellt. Des Weiteren erfolgt die Darstellung der Wertschöpfungskette in einem Flugzeug, um einen Vergleich der Hochwertteile gegenüber dem beschriebenen Materiallager schaffen zu können.

12 Darstellung der Wertschöpfungskette und Entwicklung einer Konzeptidee

In diesem Kapitel werden mögliche Einflussfaktoren auf den Umgang mit kommerziellen Flugzeugen im End-of-Life-Management beschrieben und eine Konzeptidee für dessen Außerdienststellung entwickelt. Flugzeug-, Flugzeugflottenbetreiber und Eigentümer können beispielhaft sein:

- Fluggesellschaften
- Banken und Leasingunternehmen
- Luftfahrzeug- und Ersatzteilhandel
- Versicherungsunternehmen
- Militär
- Privatpersonen
- usw.

12.1 Gründe für die Außerdienststellung von Flugzeugen

Die Lebensdauer eines kommerziell betriebenen Flugzeugs beträgt zwischen 20 und 30 Jahren. Rechtzeitig gegen Ende des Lebenszykluses setzt sich ein Halter idealerweise mit dem entsprechenden End-of-Life-Management auseinander. In Abbildung 77 ist eine generische Darstellung der Kosten (Cost) und des Gewinns (Revenue) über die Zeit dargestellt, die aus dem Betrieb eines Flugzeugs resultieren. Diese zeigt u. a., dass der Schnittpunkt, an dem die Betriebskosten höher liegen als die Gewinne, zwischen 20 und 25 Jahren liegt.

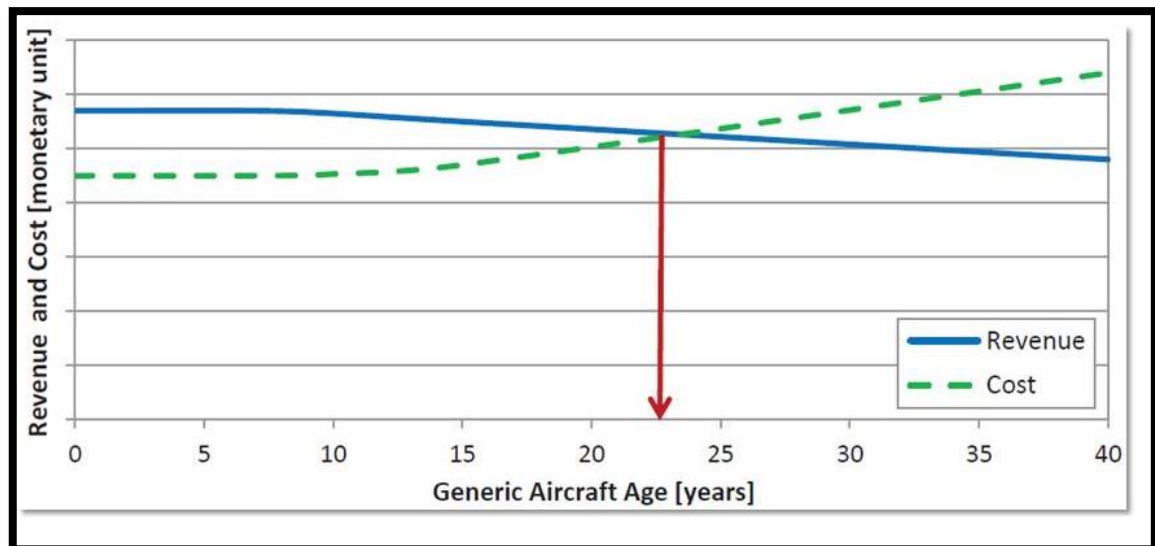


Abbildung 77: Generische Darstellung von Gewinn und Betriebskosten eines Flugzeugs über die Jahre [140]

Im Einzelnen können die ausschlaggebenden betriebswirtschaftlichen Überlegungen, ein Flugzeug endgültig außer Dienst zu stellen, sehr vielschichtig sein. Beispielhaft lassen sich folgende Gründe für eine Außerdienststellung von Flugzeugen anführen:

- Mit dem Flugzeug-Lebensalter überproportional steigende Wartungs- und Instandhaltungskosten durch u.a.:
 - Korrosionsschäden
 - Haarrisse in der Struktur
 - Steigende Relevanz von Havarie-Schäden (gemessen am Restwert des Flugzeugs)
- Vergleichsweise hoher Kerosinverbrauch gegenüber modernen Flugzeugmustern
- Lautstärke der Triebwerke und damit
 - steigende Start- und Landegebühren
 - potenzielles Anflugverbot von Flughäfen aufgrund von Lärmschutzanforderungen
- Nachfrage nach Hochwertteilen (monetärer Wert und Grad der Kommunalität).

Im Fall der finalen Außerdienststellung eines Flugzeugs kann ein funktionierendes Geschäftsmodell im Rahmen des End-of-Life-Managements nur im engen Zusammenspiel zwischen insbesondere Eigentümer, an der Verwertung beteiligten Unternehmen sowie den involvierten Behörden (Luftrecht und Abfallrecht) erfolgreich sein. Dies umfasst die Einbindung

- des Eigentümers des Altflugzeugs,
- eines zertifizierten Part 145 MRO-Betriebs,
- des Flugzeugherstellers,
- der involvierten Behörden zur rechtlichen Abwicklung,
- eines qualifizierten Rückbau- und Entsorgungsfachbetriebs für die Restzelle,
- eines qualifizierten Logistikunternehmens und
- eines adäquaten Aufbereitungsunternehmens des Verbundes Altflugzeug.

Im Automobilbereich haben sich Sammel- und Entsorgungssysteme durch die Kfz-Werkstätten etabliert. Die sog. Werkstattentsorgung wird von Automobilherstellern für die Kunden von den Vertragswerkstätten angeboten. Dabei werden nutzbare Komponenten, wie z. B. Motor und Getriebe, ausgebaut, gesammelt und, falls wirtschaftlich darstellbar, zu runderneuerten Bauteilen mit Garantieleistung aufgearbeitet. Die Restzellen der Karosserie und enthaltene Reststoffe werden der stofflichen Verwertung bzw. Entsorgung zugeführt. Diese Verwertungsgrundlagen für Kraftfahrzeuge sind in der Altfahrzeugverordnung geregelt, die auch verbindliche Verwertungsquoten fordert, vgl. Kapitel 3.2.3. (S. 36).

Dieses System könnte analog auf Flugzeugherstellere Betriebe, ggf. in Kooperation mit den Part 145 MRO-Betrieben und geeigneten Verwertungsunternehmen übertragen werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass hier die Vorgehensweise durch die gesetzlich geforderte Zertifizierung von den Baugruppen und Komponenten wesentlich komplexer ist, vgl. Kapitel 7, (S. 90).

Auf die Luftfahrt übertragen, käme die Rolle des Automobilherstellers den Flugzeugherstellern zu. Die Aufgabe der Vertragswerkstatt würde von dem Part 145 MRO-Betrieb übernommen. Die vertraglichen Regelungen zwischen Herstellern und Vertragswerkstätten im Automobilbereich könnten im Luftfahrtbereich über

ein Joint Venture zwischen den Flugzeugherstellern, Part 145 MRO-Betrieben und qualifizierten Entsorgungsfachbetrieben (Efb) abgebildet werden.

Ein solches Kooperationsmodell würde eine lückenlose Dienstleistungskette unter Berücksichtigung der Anforderungen von Luftrecht und Abfallrecht gewährleisten. Ein gesetzlicher Rahmen analog der europäischen Altfahrzeugrichtlinie im Automobilbereich würde den beschriebenen Ansatz rechtlich untermauern.

Abschließend sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass über diesen Ansatz auch eine zertifizierte Unbrauchbarmachung von nicht wieder-einsetzbaren Materialien und Komponenten sichergestellt werden kann, bevor diese der stofflichen Verwertung zugeführt werden, vgl. Kapitel 8.7 (S. 129), wie behördlich gefordert.

12.2 Vorstellung der entwickelten Konzeptidee

Für ein funktionierendes Geschäftsmodell und den ganzheitlichen Umgang mit Flugzeugen zum Ende des Lebenszykluses sollte idealerweise ein komplettes Dienstleistungsspektrum für den Besitzer des Flugzeugs angeboten werden. Damit können die einzelnen Schnittstellen und Übergänge für die Verantwortlichkeiten klar definiert, realisiert und dokumentiert werden. Wie in Abbildung 78 dargestellt, umfasst dieses

- die Schätzung des Restwerts des Flugzeugs,
- den dokumentierten und zertifizierten Ausbau der Hochwertteile,
- die Logistik, Lagerung und Veräußerung der Hochwertteile,
- die Erfüllung der luftrechtlichen Anforderungen
(Abmeldung des Flugzeugs bei Behörden und Hersteller),
- die Schadstoffentfrachtung und Trockenlegung,
- den Rückbau der Flugzeugzelle,
- die Logistik der Sekundärrohstoffe und Reststoffe,
- die Aufbereitung der Sekundärrohstoffe und
- die Entsorgung (Verwertung und Beseitigung) der Reststoffe.

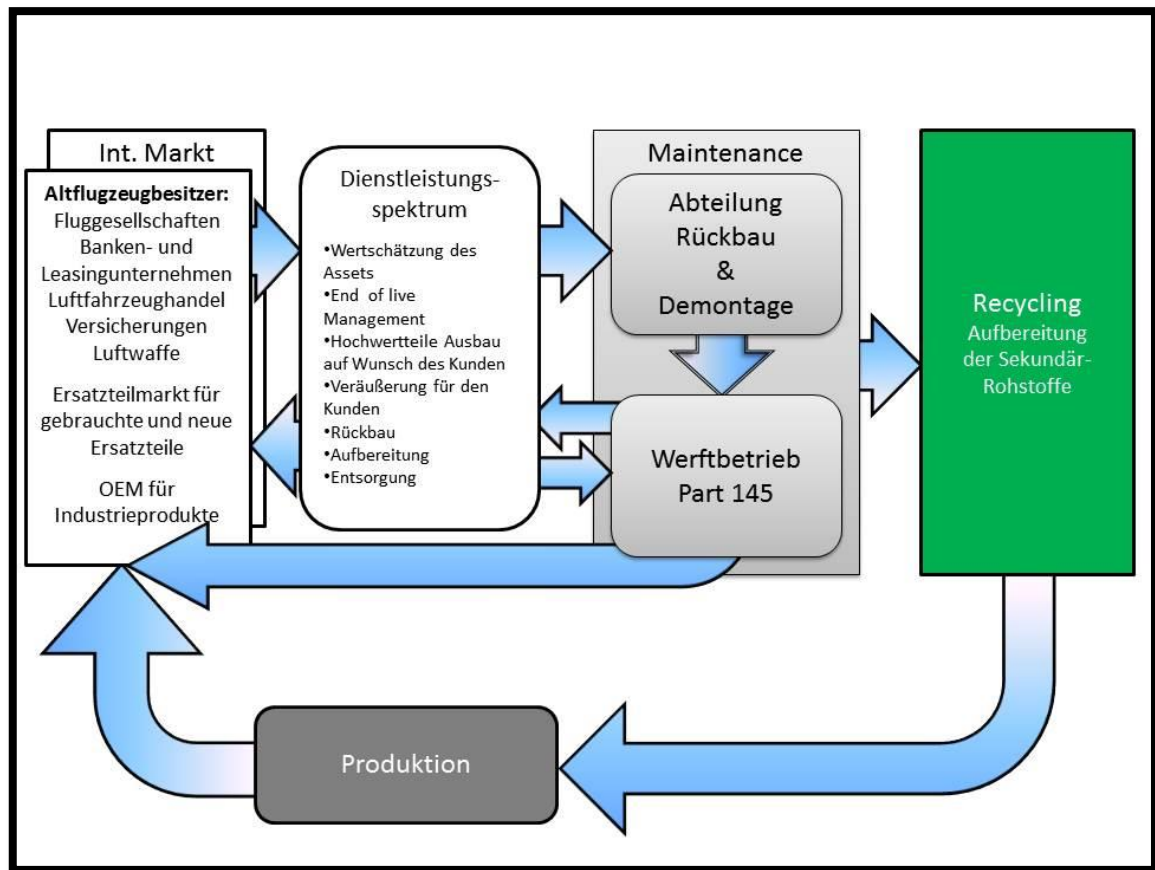


Abbildung 78: Konzeptidee für den Umgang mit Flugzeugen im End-of-Life-Management (eigene Darstellung)

Im erarbeiteten Konzept wird das Altfahrzeug/Altflugzeug nach der Außerdienststellung mit der AVV-Nummer 160104* unter Angabe von Typenbezeichnung, letzter Länder-Kennzeichnung, Manufacturer Serial Number (MSN) und einer Liste der ausgebauten Hochwertteile des Part 145 MRO-Betriebs von dem Eigentümer des Altflugzeugs an einen qualifizierten Entsorgungsfachbetrieb (Efb) als gefährlicher Abfall zum Recycling übergeben.

Diese Schnittstelle befindet sich in Abbildung 78 nach dem Maintenance-Block, wenn alle Hochwertteile ausgebaut sind und das Flugzeug abgemeldet wurde. Ein Efb (in Deutschland) führt eine professionelle Schadstoffentfrachtung mit einer gesetzlich geforderten umweltkonformen Entsorgung des Altflugzeugs (Restzelle) durch, vgl. Kapitel 8. Der Efb händigt dem ehemaligen Besitzer einen Entsorgungsnachweis der gefährlichen Abfälle, unter Beteiligung des Beförderers, aus. Auf der Basis des Gewichtes kann dem ehemaligen Eigentümer eines Altflugzeuges ein börsenabhängiger Preis für die Übernahme des aufzubereitenden Restmaterials angeboten werden, vgl. Kapitel 11.

Abschließend erhält dieser ein Dokument mit u.a. einer Liste der sensiblen, unbrauchbargemachten LLPs und der finalen Gewichtsangabe des übernommenen Altflugzeugs mit der AVV-Nummer 160106 für einen nun ungefährlichen Abfall. Durch diesen Prozess kann eine qualifizierte Entsorgung der gefährlichen Abfälle und eine Aufbereitung des Altflugzeugs im Sinne des KrWG lückenlos dokumentiert nachgewiesen werden. Darüber hinaus wird mit diesem Vorgehen einer möglichen Verbreitung von Teilen zweifelhafter Herkunft (Suspected unapproved Parts, SUP) vorgebeugt.

12.3 Darstellung der Wertschöpfungskette bei der Verwertung von Flugzeugen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebene Konzeptidee bezieht sich auf die Kooperation zwischen einem Part 145 MRO-Betrieb, einem Hochwertteilehändler sowie einem qualifizierten Entsorgungsfachbetrieb. Ein ausschlaggebender Aspekt bei der ganzheitlichen Betrachtung ist, dass die hochpreisigen wiederverwertbaren Komponenten, bezogen auf das Gesamtgewicht, nur einen geringen Massenanteil von 10 - 15 % haben. In Bezug auf die Wertschöpfung ist dieses aber zurzeit der relevante Anteil, der 90 - 95 % des Restwertes des Flugzeugs ausmacht.

Dass die Hochwertteile einen so hohen Wert haben, ist insbesondere den Triebwerken zuzuschreiben. Diese sind typischerweise sehr wertstabil. In Abbildung 79 ist der Wert eines gängigen Triebwerkmusters, CFM56 - 7B, dargestellt, das u.a. im Flugzeugmuster einer Boeing B737 - 800 eingesetzt wird. Es ist klar zu erkennen, dass der Wert des gesamten Flugzeugs über die dargestellten 21 Jahre Lebensdauer sinkt. Das genutzte Triebwerk hingegen bleibt weitestgehend wertstabil und macht zum Ende des betrachteten Zeitraums immer noch einen Großteil des Gesamtwertes des Flugzeugs, hier ca. 80 %, aus. Bei dieser Betrachtung wird angenommen, dass die überholten Triebwerke nach den Wartungsereignissen (z. B. Overhaul oder D - Check) als neuwertig anzusehen sind und daher keinen Wertverlust über die Zeit erleiden. Der leichte Wertanstieg des Triebwerks in den ersten 7 Jahren ist darauf zurückzuführen, dass der jährliche Wertverlust durch den überproportionalen Anstieg des Triebwerks-Neupreises überkompensiert wird.

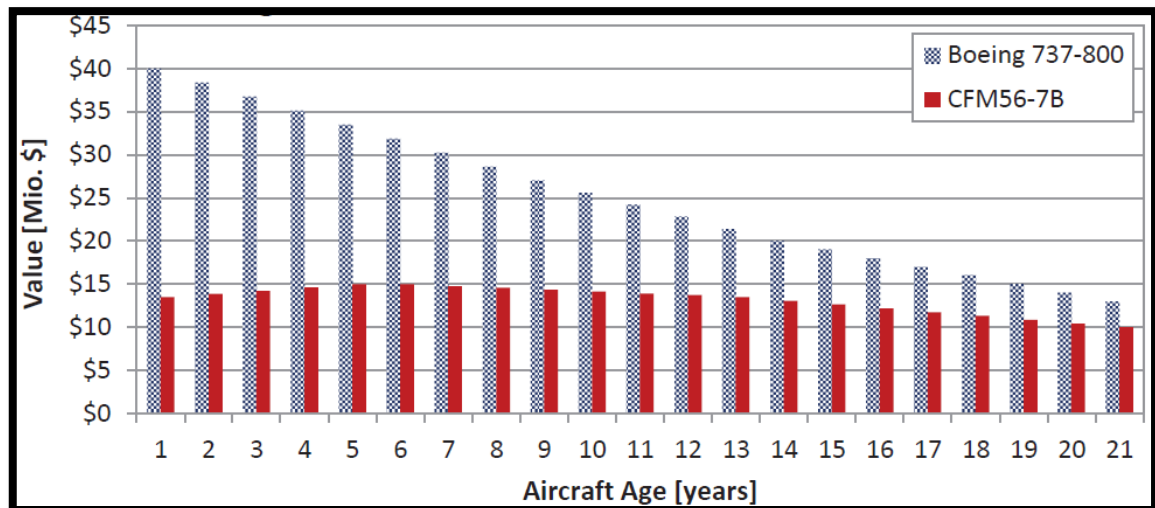


Abbildung 79: Entwicklung von Triebwerks- und Flugzeugwerten über die Jahre [140]

Im Vergleich zu den Hochwertteilen mit 10 - 15 % liegt der Massenanteil der gewinnbringenden Sekundärrohstoffe mit 50 - 60 % wesentlich höher. Ihr Wert hingegen beträgt nur ca. 10 % des Restwertes des Flugzeugs ohne die Triebwerke und die Avionik. Den Erlösen der Sekundärrohstoffe stehen allerdings die Kosten der Schadstoffentfrachtung und die Entsorgungskosten der Reststoffe gegenüber. Diese Entsorgungskosten betragen 10 - 15 % des Restwertes des Flugzeugs, siehe Abbildung 80. Durch die aufwendigen Anforderungen, wie die umweltkonforme Schadstoffentfrachtung, die erforderliche Vorzerkleinerung inkl. Logistik, die stoffliche Verwertung der Sekundärrohstoffe und die Entsorgung der Reststoffe der Restzelle, kann zurzeit in den meisten Fällen und in Abhängigkeit von der anfallenden Masse nicht kostendeckend gearbeitet werden.

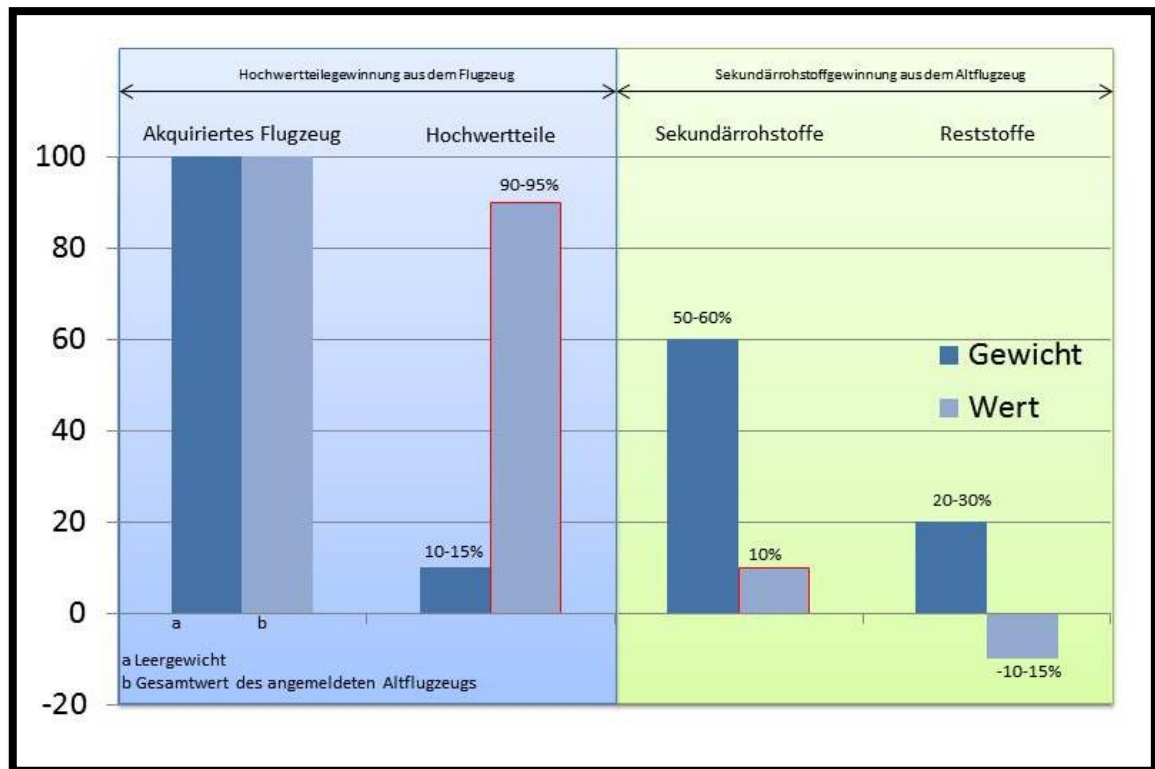


Abbildung 80: Wertschöpfungskette bezogen auf die Masse eines Flugzeugs [141]

Daher ist es derzeit nur bedingt möglich, die Dienstleistung des Rückbaus einem Kunden kostendeckend anzubieten. Eine isolierte Betrachtung der Sekundärrohstoffgewinnung im Rahmen der Verwertung eines Flugzeugs führt damit zum Ergebnis, dass diese Dienstleistung tendenziell eher eine Kosten- statt einer Gewinnposition für den Flugzeugeigentümer ist, solange das Flugzeug ohne laufende Kosten abgestellt werden kann.

Ein anderes Bild würde sich ergeben, wenn entweder die Flugzeugeigentümer nachhaltig arbeiten und das entsprechende End-of-Life-Management konsequent unter Berücksichtigung der Verwertung der Restzelle betreiben würden bzw. per Gesetzgebung dazu verpflichtet wären oder aber die Flugzeughersteller auf Basis einer Rücknahmeverpflichtung in Verantwortung genommen würden. Diese Betrachtungsweise setzt aber voraus, dass die hohen Umweltstandards des europäischen Raums weltweite Gültigkeit haben.

12.4 Betrachtung verschiedener End-of-Life Szenarien

Auf Basis des vorgestellten möglichen Geschäftsmodells (Abbildung 78, S. 182) können sich unterschiedliche Prozesswege im End-of-Life-Management von Flugzeugen ergeben. Zum einen kann der Weg eines lufttüchtigen Flugzeugs und zum anderen der Weg eines nicht lufttüchtigen Flugzeugs betrachtet werden, vgl. Abbildung 81.

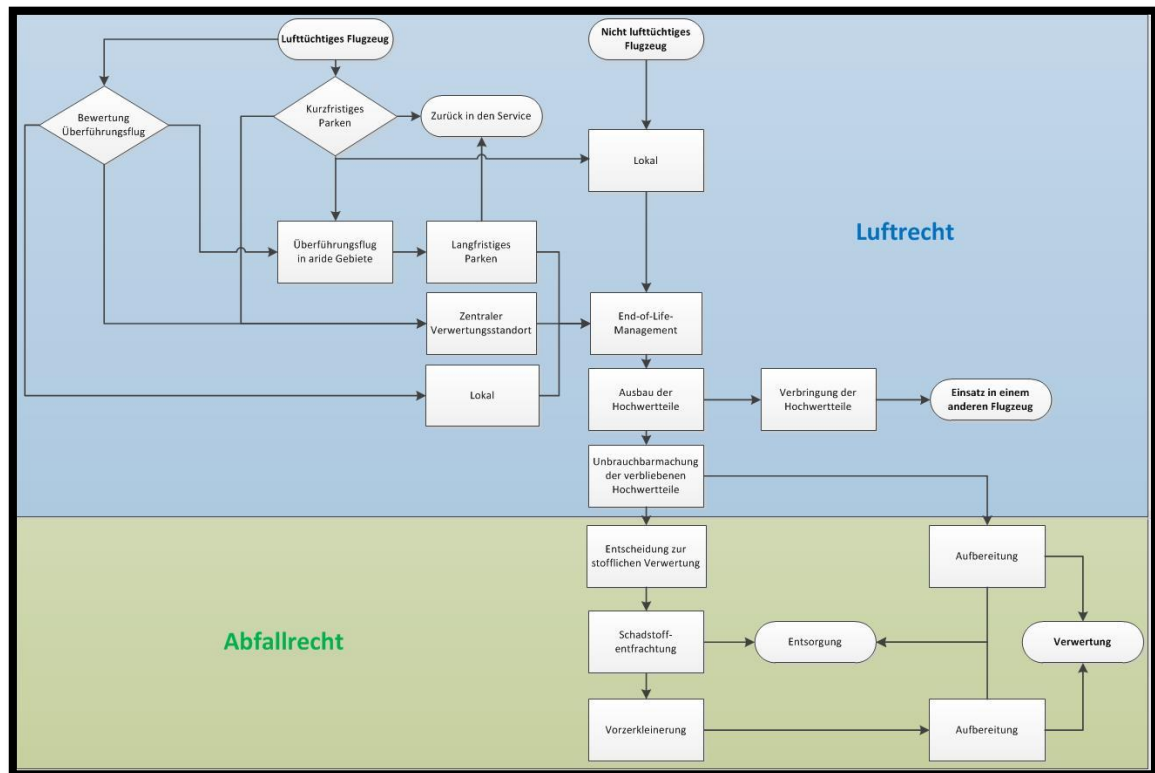


Abbildung 81: Prozessdarstellung alternativer Verwertungsszenarien von Flugzeugen im End-of-Life Management (eigene Darstellung)

Bei einem Flugzeug, das noch lufttüchtig ist, besteht die Möglichkeit, es kurzfristig überall zu parken, wenn der Betreiber, z. B. aus betriebswirtschaftlichen Gründen, dazu gezwungen ist. Für längere Stillstandszeiten ist ein Überführungsflug für ein langfristiges Parken in ariden Gebieten zu empfehlen. Dies könnte beispielsweise in den USA sein oder aber auch ein Platz in Europa, z. B. Teruel (Spanien). Die dritte Alternative besteht darin, das Flugzeug an einen zentralen Verwertungsstandort zu überführen.

Im Fall eines nicht lufttüchtigen Flugzeugs kommt demgegenüber nur eine lokale Verwertung in Frage. Hierbei werden die angegebenen Prozessschritte vom Ausbau der Hochwertteile bis zur stofflichen Verwertung inklusive Entsorgung

gung der Reststoffe am lokalen Standort des luftuntüchtigen Flugzeugs durchlaufen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass im Prozessschritt der Unbrauchbarmachung nichtgenutzter Hochwertteile der Übergang vom Luft- zum Abfallrecht stattfindet.

Das Kosten-Nutzen-Verhältnis muss für jedes in Abbildung 81 angegebene Verwertungsszenario individuell bewertet werden. Dabei ist u.a. zu ermitteln, wie groß der Aufwand für einen potenziellen Überführungsflug als einem der Kostentreiber ist. Aus Tabelle 27 (S. 136) wird am Beispiel eines Überführungsflugs Frankfurt-USA ersichtlich, dass diese Kosten maßgeblich vom Kerosinverbrauch bestimmt werden. Ein zweiter wichtiger Aspekt betrifft die Kosten für den Ausbau von Komponenten durch einen Part 145 MRO-Betrieb sowie deren Rückführung an den Lager- bzw. Verwendungsstandort. Weiterhin sind die Schadstoffentfrachtung und der Ertrag der stofflichen Verwertung zu kalkulieren, auch unter Berücksichtigung der entwickelten und vorgestellten dezentralen Einheit zur Vorzerkleinerung. Auf Basis dieser Bewertungen ist dann eine Entscheidung zum finalen Verwertungsweg zu treffen.

Die maßgeblichen Einflussgrößen im Fall eines Flugzeugrückbaus an einem Verwertungsstandort im Rahmen des End-of-Life-Managements sind in Tabelle 41 zusammengefasst.

Tabelle 41: Gegenüberstellung der Einflussgrößen bei der Stilllegung eines Flugzeugs mit anschließendem Rückbau

Positiver monetärer Einflusswert	Negativer monetärer Einflusswert
Wiederverwendung ggf. nach Aufbereitung durch einen MRO-Betrieb, z. B. Wert der veräußerbaren zertifizierten Hochwertteile	Überführungsflug zum Parken
Weiterverwendung von Bauteilen, z. B. für Forschungseinrichtungen, durch Künstler usw.	Instandhaltungs- und Wartungskosten der Flugzeuge
Weiterverwendung für Mock-Up Bau, z. B. Simulatoren oder Messebau	Gebühren für das Parken der Flugzeuge und die Nutzung einer Rückbaufläche
Materialwert der Sekundärrohstoffe im Fall stofflicher Verwertung	Investitions-, Bereitstellungs- und Demontagekosten, z. B. Ausbau der zertifizierten Hochwertteile
Einsparen der langjährigen Parkgebühren	Hohe gesetzliche regionale Anforderungen, die Kosten verursachen
	Hoher logistischer Aufwand u. a. auch durch Einfluss von Sicherheits- und Zollbereichen
	Vorzerkleinerungskosten
	Aufbereitungskosten
	Berücksichtigung von Im- und Exportzoll
	Versicherungen und Rechtsschutz

12.5 Beispielkalkulation Rückbau eines Airbus A300 - B4F

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Pilotprojekt an einem Airbus A300 - B4F mit einem Leergewicht von 88,5 t kalkuliert und realisiert. Dieses Muster ist ein Mittelstreckenflugzeug und wird zur Widebody-Flugzeugklasse gezählt. Bei dieser Ausführung handelte es sich um die Frachtflugzeug-Variante. Aufgrund irreparabler Schäden an der Flugzeugzelle im Bereich der Tragflügel (Rippe 5) wurde dieses Flugzeug in Deutschland stillgelegt und abgemeldet. Im Rahmen der stofflichen Verwertung wurde eine fachgerechte umweltkonforme Schadstoffentfrachtung, Vorzerkleinerung, Aufbereitung und Entsorgung der Reststoffe in Deutschland durchgeführt. Das Projekt wurde auf Basis der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Erkenntnisse und daraus abgeleiteten Verfahrensschritte umgesetzt. Der Aufwand für die potenzielle Schadstoffentfrachtung und Vorzerkleinerung wurde mit einem Zeitrahmen von 6 Arbeitstagen à 12 Arbeitsstunden angenommen und auch realisiert.

Der Verkauf des Altflugzeugs erfolgte auf einer Gewichtsbasis von 60,2 t. Das verwertbare Materiallager nach der Hochwertteilegewinnung und Schadstoffentfrachtung lag bei diesem Projekt etwa 8 % höher als die diskutierten ca. 60 % aus Kapitel 11.2 (S. 166). Hintergrund ist, dass kein Interieur, wie z. B. Passagierbestuhlung, Küchen usw. in diesem Flugzeug enthalten war, da es sich um eine Frachtflugzeug-Variante handelte.

Wie in Tabelle 42 zusammengefasst, wurde der Materialwert mit den in Kapitel 11.4 hergeleiteten 995 €/t angenommen. Die Aufbereitung des Materials zu einem Sekundärrohstoff wurde mit 150 €/t kalkuliert und die Logistik mit 60 €/t angesetzt. Das Altflugzeug hatte damit einen Restwert auf Materialbasis von 59.899 €. Das vorgestellte, an einem Standort in Deutschland umgesetzte Projekt zeigt auf, dass bei einer geringen Materialmasse im Verbund Altflugzeug ein kleiner Überschuss von 743 € generiert werden konnte.

Tabelle 42: Projektkalkulation zum Rückbau Airbus A300 - B4F

Positionen	Betrag in €
Materialwert Altflugzeug Airbus A300 - B4F	59.899,00
Abzüglich Aufwendung für Efb [142]:	
Schadstoffentfrachtung und Vorzerkleinerung	-48.000,00
Logistik	-3.612,00
Aufbereitung und Entsorgung	-9.030,00
Überschuss	743,00

Um den Einfluss der Masse eines Altflugzeugs auf den Erlös des Rückbaus zu illustrieren, kann auf Basis der Daten des vorgestellten Projektes eine exemplarische Vergleichsrechnung mit einem schweren Wide-Body Flugzeug, wie z. B. einer Boeing B747 - 400 (ca. 184,5 t Leergewicht [143]), vorgenommen werden. Unter Annahme von verwertbaren 60 % Materialmasse resultieren in diesem Fall ca. 111 t Material, die für die stoffliche Verwertung zur Verfügung stehen. In diesem Fall können analog 9 Arbeitstage à 12 Arbeitsstunden für den Rückbau des Altflugzeugs angenommen werden. Für die Logistik und Aufbereitung gelten die gleichen Parameter wie im Vergleichsprojekt des Airbus A300 - B4F. In diesem hypothetischen Fall würde bei der zugrunde gelegten Masse des Altflugzeugs ein Überschuss in Höhe von 15.135 € entstehen, vgl. Tabelle 43.

Tabelle 43: Projektkalkulation zum potenziellen Rückbau einer Boeing B747 - 400

Positionen	Betrag in €
Materialwert Altflugzeug Boeing B747 - 400	110.445,00
Abzüglich Aufwendung für Efb	
Schadstoffentfrachtung und Vorzerkleinerung	-72.000,00
Logistik	-6.660,00
Aufbereitung und Entsorgung	-16.650,00
Überschuss	15.135

Für die Umsetzung von Rückbauprojekten gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren. Je nach Standort und Zustand des Altflugzeugs zählen u. a. diese Parameter:

- der Demontagestandort
- die Parkgebühren an Flughäfen für Flugzeuge
- die Entnahme und Entsorgung von gefährlichen Abfällen nach Aufwand
- die Vorzerkleinerung
- die grobe Vorsortierung der Materialien des Altflugzeugs am Flughafen
- die Logistik für das Equipment
- die Verbringung des vorzerkleinerten Materials zur Aufbereitungsanlage
- evtl. zollrechtliche Angelegenheiten, wie Im- und Exportzoll
- die Versicherungen
- die Aufbereitungskosten in sortenreine Sekundärrohstoffe
- der volatile Metallhandel
- die Produkthaftungsverantwortung.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde derzeit nur eine kleine Stückzahl der stillgelegten weltweiten Altflugzeuge für die stoffliche Verwertung betrachtet. Die bisherigen Erfahrungen haben gezeigt, dass durchaus eine signifikante Sensitivität des finanziellen Rückbauergebnisses zu diesen aufgezählten Einflussgrößen besteht. Generell gilt aber auch, dass je größer die in Form von Altflugzeugen verfügbare Masse an einem Verwertungsstandort ist - sei es über die Altflugzeuggröße oder aber über die Anzahl der Altflugzeuge - desto rentabler wird das individuelle Rückbauprojekt für das Verwertungsunternehmen und damit auch den Flugzeugeigentümer. Weiterhin ist festzuhalten, dass bei einer signifikanten Änderung einzelner Faktoren der aufgezählten Einflussgrößen sich die monetären Parameter maßgebend ändern können. Daher legt die vorliegende Arbeit einen Grundstein für weitere technische Entwicklungen und liefert betriebswirtschaftliche Indikatoren für weitere Betrachtungen im End-of-Life-Management von Flugzeugen.

13 Zusammenfassung und Ausblick

Im Verlauf dieser Arbeit wurde dargelegt, dass in den nächsten 15 Jahren weltweit ein signifikantes potenzielles Materiallager stofflich verwertbarer Materialien aus Altflugzeugen zur Verfügung steht. Unter Annahme einer durchschnittlichen Masse von 70,2 t pro Altflugzeug liegt der Umfang dieses Materiallagers in der Größenordnung von 220.000 - 340.000 t. Unter aktuellen Marktrandbedingungen mit einem Wert von 995 €/t Altflugzeug für die stoffliche Verwertung, resultiert daraus ein Gesamtwert von ca. 218 - 338 Mio. €.

Eine erste grundlegende Untersuchung in dieser Arbeit bestand in der Identifizierung und Ermittlung der vorrangig in Altflugzeugen verbauten Materialien. Aufsetzend auf einer Betrachtung der Flugzeugproduktion zeigen die Ergebnisse der Recherche, dass die Flugzeugmuster, die im Betrachtungszeitraum zur Verwertung anstehen, unter dem Aspekt der verwertbaren Masse überwiegend aus Aluminiumlegierungen bestehen.

Ein weiterer Schwerpunkt umfasste die Konzeptionierung und Realisierung einer Zerlegungsmethodik und der mechanischen Vorsortierung am Flughafen bzw. Rückbaustandort. Im Rahmen dieser Arbeit wurden dazu acht Rückbauprojekte vom Regional-Jet bis zum Widebody unter industriellen Randbedingungen durchgeführt. Dabei wurde erarbeitet, dass von einem Flugzeug ca. 60 % des Materials in die stoffliche Verwertung als Schrott gehen können. Dieses Material setzt sich im Mittel aus 77 % Al-Legierungen, 12 % Stahl, 4 % Titan, 4 % nichtmetallischen Werkstoffen und 3 % sonstigen Werkstoffen zusammen. Die verbleibenden 40 % gliedern sich auf der einen Seite in potenziell wiederverwendbare Hochwertteile (13 %) und auf der anderen Seite in Betriebs- und Reststoffe. Letztere können größtenteils einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Auf diese Weise konnte auch eine grundlegende Massenbilanz von Altflugzeugen erstellt werden, die darüber hinaus die Ergebnisse des EU-Forschungsprojektes PAMELA bestätigt.

Ein denkbarer Ansatz, die wiederverwendbaren Materialien, Hochwertteile sowie Betriebs- und Reststoffe geeigneten Verwertungskreisläufen bzw. Entsorgungskanälen zuzuführen, wäre ein System einer zertifizierten Werkstattentsorgung zu etablieren, wie es beispielsweise im europäischen Kraftfahrzeugrecycling realisiert wurde. Die grundsätzliche Voraussetzung hierfür ist ein

aufeinander abgestimmtes luftfahrt- und abfallrechtliches System sowie ein Zusammenspiel von Behörden, Werkstätten und nachgelagerten Entsorgungsfachbetrieben auf Basis klar definierter Prozesse und Schnittstellen. Auf dieser Grundlage könnte dann das betrachtete Materiallager in ein geeignetes Sammel- und Entsorgungssystem für eine adäquate stoffliche Verwertung und eine rechtskonforme Entsorgung der Reststoffe übergeben werden. Zum anderen könnten die ausgebauten Hochwertteile einer kontrollierten Wiederverwendung oder aber einer dokumentierten Vernichtung zugeführt werden. Letztere wäre auch eine Präventionsmaßnahme, um dem Auftreten von Bauteilen zweifelhafter Herkunft (SUP) entgegenzuwirken.

In einem nächsten Schritt wurden die in Flugzeugen vorhandenen Gefährdungspotenziale ermittelt und ggf. verwendete Schadstoffe lokalisiert. Für eine gefahrlose Entfrachtung und Entsorgung der gefährlichen Abfälle wurden technische Lösungen erarbeitet. Auf Basis der Material- und Inhaltsrecherche anhand repräsentativer Flugzeugmuster wurden die relevanten abfallrechtlichen Grundlagen und Vorschriften auf nationaler und europäischer Ebene zusammengestellt. In Anlehnung an die Altfahrzeugverwertung wurde ein Erstbehandlungsprozess für Altflugzeuge entwickelt und darauf aufbauend eine Handlungsempfehlung für deren Rückbau abgeleitet. In diesem Zusammenhang wurde auch eine Vorgehensweise für den Umgang mit Hochwertteilen und deren Unbrauchbarmachung entwickelt, um SUP zu vermeiden. Der resultierende Gesamtprozess beschreibt, wie ein gefährlicher Abfallverbund Altflugzeug mit der AVV-Nummer 160104* in einen ungefährlicher Abfallverbund mit der AVV-Nummer 160106 unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten übergehen kann.

Für die Umsetzung des Verwertungsprozesses von Altflugzeugen unter Betrachtung unterschiedlicher Entfrachtungs-, Aufbereitungs- und Entsorgungsalternativen wurde aufgrund deren Verfügbarkeit ein dezentraler Ansatz gewählt. Konkret wurden mobile und modulare Entsorgungseinheiten konzipiert. Die weitere Entwicklung und technische Umsetzung dieser mobilen Einheiten wurde im Rahmen des Forschungsprojektes More-Aero realisiert. Aufgrund seiner modularen und kompakten Bauweise eignet sich dieses System für standardisierte Transporte an weltweite Einsatzorte, an denen Altflugzeuge aufgrund klimatisch geeigneter Bedingungen abgestellt sind.

Bei den bisher mit dem System der mobilen Einheiten durchgeführten Projekten hat es sich um den Rückbau einzelner Flugzeuge an unterschiedlichen Standorten nach europäischen Umweltstandards gehandelt. Diese Ergebnisse zeigen, dass unter Berücksichtigung der Projektkosten für Management, Schadstoffentfrachtung, Vorzerkleinerung, Verbringung und Aufbereitung des Materials zurzeit erst ab einer bestimmten Masse (z. B. Boeing B747) ein nennenswerter Gewinn zu erzielen ist. Generell gilt, dass die Rentabilität eines Rückbauprojektes primär von der verfügbaren Flugzeugmasse und der Lage des Verwertungsstandorts abhängt.

Das End-of-Life-Management von Altflugzeugen sollte als ganzheitliche Dienstleistung mit klar definierten Schnittstellen für alle Prozessbeteiligten angeboten werden, um die Wertschöpfungskette optimal auszunutzen und dabei zugleich den rechtlichen und ökologischen Anforderungen gerecht zu werden. Die Wertschöpfungskette erstreckt sich dabei von der Abmeldung des Flugzeugs bei den involvierten Behörden, über den Ausbau bzw. die dokumentierte Unbrauchbarmachung von Hochwertteilen, bis hin zum eigentlichen Rückbau mit der abschließenden Verwertung und Entsorgung der anfallenden Materialien durch qualifizierte Entsorgungsfachbetriebe.

Weitere relevante Aspekte der Verwertung von Altflugzeugen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht detailliert betrachtet wurden, betreffen die Untersuchung der stofflichen Verwertungsmöglichkeiten der Baugruppen Triebwerk, APU und Fahrwerk sowie der Flugzeugelektrik (Avionik) und volumenträchtigen Kunststoffe aus dem Interieur-Bereich.

Die genannten Baugruppen stehen zurzeit typischerweise gar nicht oder nur in Teilen einer stofflichen Verwertung zur Verfügung. Da sie eine Vielzahl von Hochwertteilen beinhalten, werden sie entweder in Gänze ausgebaut und nach Überholung wiederverwendet oder es werden ihre Hochwertteile in größtmöglichem Umfang ausgebaut und einer Wiederverwendung zugeführt. Dennoch ist insbesondere für die Baugruppen Triebwerk und APU eine eingehende Untersuchung der stofflichen Verwertung lohnenswert, da sie u. a. eine relevante Masse hochwertiger Superlegierungen mit einem hohen Materialwert beinhalten und künftig in größeren Mengen anfallen könnten, die nicht im vollen Umfang wieder einem Refurbishment zugeführt werden können.

Gemessen am Gesamtmassenaufkommen eines Altflugzeugs macht die Elektrik inklusive Avionik nur einen Bruchteil aus. Da jedoch in ihnen wertvolle Materialien, wie u. a. Gold, Platin und Sondermetalle, verbaut sind, ist eine detaillierte Analyse auch hier angeraten. Demgegenüber ist eine stoffliche Verwertung der volumenträchtigen Kunststoffe wenig attraktiv. Im Vordergrund steht bei ihnen derzeit die umweltverträgliche Entsorgung, die in der Regel in einer thermischen Verwertung besteht.

Aus den Erfahrungen der durchgeführten Rückbauprojekte sowie der aktuellen Entwicklung moderner und zukünftiger Flugzeugmuster leiten sich im Wesentlichen zwei Entwicklungstrends bzw. –empfehlungen ab. Auf der einen Seite gilt es, das Potenzial der sensorgestützten Sortierung von Metalllegierungen, wie beispielsweise LIBS oder RFA, optimal auszunutzen. Dadurch ließe sich sowohl beim Ausbau und der Vorsortierung als auch im Aufbereitungsprozess eine deutlich höhere Trennschärfe der Metalllegierungsgruppen erreichen. Auf der anderen Seite kommen in der Flugzeugstruktur moderne Leichtbaumaterialien wie neue Aluminiumlegierungen mit Anteilen von z. B. Lithium und Scandium sowie kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe zum Einsatz. Aus Sicht der Flugzeugverwertung müssen daher zukünftig neue, komplexe aber durchaus interessante Materialströme aus dem Verbund Altflugzeug einbezogen werden.

Abschließend ist zu empfehlen, dass parallel eine Betrachtung von Triebwerken und der Avionik durchgeführt werden sollte. Die dadurch gewonnenen Daten können abschließend zusammengeführt werden, um auf diese Weise einen optimierten gesamten Verwertungsansatz für Altflugzeuge zu realisieren.

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
Airbus	A300B1	1972	1972	0	2	0	75	50,3	44,84
	A300B2	1973	1982	9	59	8	86	53,61	44,83
	A300B4	1974	1984	10	187	44	88	53,61	44,83
	A300-600	1983	2007	24	319	232	88	53,85	44,84
	A310-200	1983	2007	24	85	28	79	46,66	43,9
	A310-300	1983	2007	24	170	115	79	46,66	43,9
	A318-100	2002	in Produktion	10	78	69	38	31,45	34,1
	A319-100	1995	in Produktion	17	1336	1309	39	33,84	34,1
	A320-100	1987	1988	1	20	0	41	37,57	33,91
	A320-200	1988	in Produktion	24	3004	2793	41	37,57	34,1

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
	A321-100	1993	2002	9	86	85	47	44,5	34,1
	A321-200	1996	in Produktion	16	638	618	47	44,5	34,1
	A330-200	1997	in Produktion	15	482	452	117	58,37	60,3
	A330-300	1992	in Produktion	20	409	402	120	63,69	60,3
	A340-200	1992	2002	10	28	19	127	59,42	60,3
	A340-300	1991	2008	17	219	193	126	63,69	60,3
	A340-500	2002	in Produktion	10	33	28	170	67,93	63,45
	A340-600	2001	in Produktion	11	99	95	176	75,36	63,45
	A380-800	2005	in Produktion	7	97	80	270	72,73	79,75
Boeing	707-100	1958	1978	20	141	130	57,60	46,61	39,88
	707-200	1958	1978	20	5	s.o	57,60	44,22	39,88

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
	707-300	1958	1978	20	580	s.o.	64,60	44,22	43,40
	707-400	1958	1978	20	37	s.o.	64,60	46,61	43,00
	720	1959	1969	10	154	4	50,26	41,30	39,88
	717-200	1999	2006	7	155	134	30,62	37,81	28,45
	727-100	1963	1984	21	570	440	39,80	40,59	32,92
	727-200	1963	1984	21	1256	955	44,33	46,68	32,92
	737-100	1967	1973	6	30	0	28,12	28,65	28,35
	737-200	1967	1988	21	1082	277	27,17	30,53	28,35
	737-300	1984	1999	15	1129	730	31,48	33,40	28,88 (31,12)
	737-400	1985	2000	15	486	391	33,19	36,40	28,88
	737-500	1990	1999	9	389	284	31,31	31,01	28,88
	737-600	1998	in Produktion	14	69	60	36,38	31,24	34,32 (35,79)

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
	737-700	1997	in Produktion	15	1210	1186	37,65	33,63	34,32 (35,79)
	737-800	1997	in Produktion	15	2586	2590	41,41	39,47	34,32 (35,79)
	737-900	2000	in Produktion	12	207	186	42,49	42,11	34,32 (35,79)
	747-100	1969	1986	17	202	22	162,50	69,80	59,64
	747-200	1970	1991	21	389	76	172,86	69,80	59,64
	747-300	1983	1990	7	81	29	173,03	69,80	59,64
	747-400	1988	2009	21	694	613	179,02	69,85	64,40
	747-8	2011	in Produktion	1	20	22	325,23	75,25	68,50
	747SP	1976	1989	13	45	15	147,72	55,85	59,64
	757-200	1982	2005	23	994	870	59,35	47,32	38,05
	757-300	1999	2004	5	55	55	64,58	54,43	38,06

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
	767-200	1981	in Produktion	31	249	148	80,29	48,51	47,57
	767-300	1986	in Produktion	26	735	693	88,47	54,90	47,57
	767-400	1999	in Produktion	13	38	37	103,15	61,37	51,99
	777-200	1994	in Produktion	18	559	554	134,80	63,73	60,93
	777-300	1997	in Produktion	15	398	404	159,57	73,80	60,93
	777F	2008	in Produktion	4	60	60	144,38	63,73	64,80
	787-8	2006	in Produktion	6	9	37	161,03	56,70	60,10
Bombardier Aerospace	CRJ100	1991	1996	5	241	141	13,24	26,77	21,21
	CRJ200	1995	in Produktion	17	842	676	13,24	26,77	21,21
	CRJ 440	2001	in Produktion	11	65	65	13,24	26,77	21,21
	CRJ700	1999	in Produktion	13	349	345	19,73	32,51	23,24

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
	CRJ900	2001	in Produktion	11	262	252	21,43	36,40	24,85
	CRJ1000	2007	in Produktion	5	25	25	?	39,10	24,56
	Challenger 800	2006	in Produktion	6	33	1	*)	*)	*)
Bombardier Aerospace	DHC-8 Q100	1984	1995	11	304	223	10,38	22,25	25,91
(früher: de Havilland Canada)	DHC-8 Q200	1993	In Produktion	19	97	85	10,49	22,25	25,91
	DHC-8 Q300	1987	in Produktion	25	268	238	11,67	25,69	27,43
	DHC-8 Q400	1998	in Produktion	14	414	380	16,58	32,84	28,42
Aérospatiale & British Air- craft Corporation	Concorde 101/102	1962	1979	17	20	0	78,90	61,66	25,60
EMBRAER	120	1985	2007	22	352	198	7,07	20,00	19,78

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
(Empresa Brasileira de Aeronautica, S. A.)	135	1998	in Produktion	14	325	263	11,12	26,33	20,04
	140	2000	in Produktion	12	74	73	11,82	28,45	20,04
	145	2003	in Produktion	9	750	666	21,81	29,87	20,04
	170	2004	in Produktion	8	190	180	20,15	29,90	26,00
	175	2004	in Produktion	8	150	147	21,81	31,68	26,00
	190	2004	in Produktion	8	446	433	28,08	36,24	28,72
	195	2004	in Produktion	8	99	96	28,97	38,65	28,72
Fokker	Fokker 50 (F27-50)	1987	1997	10	213	168	12,57	25,25	29,00
	Fokker 70 (F28-0070)	1994	1997	3	48	47	22,78	30,90	28,08
	Fokker 100 (F28-0100)	1987	1997	10	283	175	24,27	35,53	28,08

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
Lockheed / Lockheed- Martin	L-1011 Tristar	1971	1983	12	250	17	101,99	54,35	47,35
McDonnell Douglas	DC-10	1971	1988	17	446	157	121,20	55,35	50,41
	MD-11	1990	2000	10	200	173	125,87	61,20	51,60

[illegible][illegible]

Anhang A: Übersicht der 36 größten Flugmuster

Hersteller	Flugzeug- typ	Erst- Bau- jahr	Letzt- Baujahr	Produktions- jahre	Anzahl der Modelle	Anzahl der aktiven Modelle	Leer- gewicht in t	Länge in Meter	Spann- weite in Meter
Summe	83				30610	23903			
					Anzahl inaktiver Flieger:	6707			

Anhang B: Verwendete Legierungen im Flugzeugbau

Die folgende Tabelle wurde dem HSB <Handbuch Struktur Berechnung>, Kapitel 11020-02 <material properties, qualitative data aluminum and aluminum alloys>, Issue B, Jahr 08, entnommen. Das HSB wird von Mitgliedern des Arbeitskreises Industrieausschuss Strukturberechnungsunterlagen (IASB) des Luftfahrttechnischen Handbuchs (LTH) erarbeitet und herausgegeben.

Code	Hauptlegierungsbestandteil
1XXX	Mind. 99,0 % Al (Reinaluminium)
2XXX	Kupfer
3XXX	Mangan
4XXX	Silicium
5XXX	Magnesium
6XXX	Magnesium und Silicium
7XXX	Zink
8XXX	Andere Legierungen z. B. Lithium

1000 Serie	
1100/1050	<ul style="list-style-type: none"> Gute Korrosionsbeständigkeit Anwendung als Blech- und Rohrmaterial Anwendung als Verkleidungs- und Plattierungsmaterial
2000 Serie	
2024	<ul style="list-style-type: none"> Hauptanwendung als Blech- und Rohrmaterial Anwendung als Spritzguss und Strangguss
2024 Clad T3, T351	<ul style="list-style-type: none"> Basis Legierung für die zugbelastete Rumpfhaut Basis Legierung für „Glare“ Folien
2024 Clad T3, T351 High damage Tolerance Properties (2524)	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Schadenstoleranz Wird oft kombiniert mit Stringer 7349
2024 T3511	<ul style="list-style-type: none"> Wird verwendet in Ermüdungs- und sensiblen Schadenstoleranzbereichen

2024 T42 (2024 Clad T42)	<ul style="list-style-type: none"> • Wird verwendet für die Außenhaut mit gewölbter Krümmung
2024 Clad T42 High Damage Tolerance Properties (2542)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Toleranz- und Schädeneigenschaften • Basis Legierung für die zugbelastete Rumpfhaut
2219 T81	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Temperaturbelastung möglich • Typischer Einsatz, Lufteinlass der Triebwerksgondel
2026/2072 T3511 High Damage Tolerance Properties	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz Stringer Flügelunterseite
2024 T42	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz Rumpfgerüst
2024 T351	<ul style="list-style-type: none"> • Außenhaut Flügelunterseite
2024/2024A HDT T351	<ul style="list-style-type: none"> • Außenhaut Flügelunterseite
2027 T351	<ul style="list-style-type: none"> • Center wing box
2124 T351	<ul style="list-style-type: none"> • Außenhaut Flügelunterseite
2618 T851	<ul style="list-style-type: none"> • Entwickelt für die Concorde
5000 Serie	
5XXX(AlMgSc)	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Schadenstoleranz • Hohe Korrosionsbeständigkeit
5025	<ul style="list-style-type: none"> • Salzwasser resistent • Schweißbar • Typischer Einsatz, Lufteinlass der Triebwerksgondel
5083 SPF (super plastic forming)	
5086 H111	
6000 Serie	
6061 T4;T6;T42;T62	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung für Rohre mit hohem Innendruck • Gut schweißbar
6013/6056 Clad T62	<ul style="list-style-type: none"> • Stringer können mit der Haut verschweißt werden • Verwendung in der Rumpfunterschale
6013/6156 Clad T62 High Damage Tolerance Properties	<ul style="list-style-type: none"> • Stringer können mit der Haut verschweißt werden • Hohe Toleranz- und Schädeneigenschaften • Verwendung in der Rumpfunterschale

6056 T78XXX	<ul style="list-style-type: none"> • Stringer können mit der Haut verschweißt werden • Verwendung in der Cockpit Unterseite
6110A T6511	<ul style="list-style-type: none"> • Stringer können mit der Haut verschweißt werden
7000 Serie	
7020	<ul style="list-style-type: none"> • Korrosionsbeständig • Nicht Salzwasser resistent
7075/7175	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung in Bögen und Platten über 100mm • Anwendung Spritzguss, Strangguss, Schmieden
7475	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der 7075
7050/7010	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung in Bögen und Platten über 100mm
7040/7050 T7451 HT (High Toughness)	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung in Bögen über 200mm
7055/7349/7136 T76XXX	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung obere Stringer der Center-Wing-Box
7475 Clad T761 or T7651 or T762	
7085 T7652/T7654	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung für Flügel-Innenholme
7150 T7751	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung Flügel-Rippen
7449 T79XXX	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung Flügel-Oberhaut
7475 T762 SPF	

Lebenslauf

Dipl.- Ing. (FH) Sebastian Jeanvré
Email: Sebastian@Jeanvre.eu
Homepage: www.Jeanvre.eu



Zur Person

Geburtsdatum	30.04.1981
Geburtsort	Braunschweig
Familienstand	verheiratet, 1 Kind

Berufspraxis

Seit 01/2015	Leiter für technische Projektentwicklung, Corporate Development (CRONIMET Holding GmbH, Karlsruhe)
03/2014 bis 12/2014	Trainee (CRONIMET Holding GmbH, Karlsruhe)
Seit 05/2012	Eigentümer (Ingenieurbüro Jeanvré, Wolfsburg)
06/2010 bis 12/2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter / Doktorand (Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik (IFAD), TU Clausthal)
03/2011 bis 10/2013	Projektleiter / Kontrollorgan Betriebshof (Keske Entsorgung GmbH, Braunschweig)
10/2009 bis 02/2011	Technischer Sachbearbeiter (Keske Entsorgung GmbH, Braunschweig)
11/2008 bis 09/2009	Technischer Sachbearbeiter (ED WORK GmbH & CO. KG, Wolfsburg)
02/2008 bis 08/2008	Diplomand (Volkswagen AG, FE Wolfsburg)
10/2004 bis 08/2008	Studium an der Fachhochschule Bs. / Wf. Standort Wolfsburg Fakultät: Fahrzeugbau Fachbereich: Produktions- und Verfahrenstechnik Studiengang: Recycling Studienschwerpunkte: <ul style="list-style-type: none">▪ Verfahrenstechnik▪ Prozesstechnik▪ Recyclingtechnologien.

Literaturverzeichnis

- [1] Dr. Olaf Kropp: Organisation der Sonderabfallentsorgung durch die Landesgesellschaften, Andienung. URL: <http://www.info-ags.de/andienung.html>. Abrufdatum 03.08.2015.
- [2] Bundesministerium für Finanzen: Zoll online - Allgemeines. URL: http://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Zoelle/Zollrechtliche-Bestimmung/Zollverfahren/Voruebergende-Verwendung/Carnet-ATA/Allgemeines/allgemeines_node.html. Abrufdatum 03.08.2015.
- [3] Thomas Giesen, CRONIMET Holding GmbH: Chargierfähigkeit, Interview (2014). Karlsruhe.
- [4] ATCC, Part-147 Maintenance Training Organisation DE.147.0013: Aviation Glossar rund um Maintenance Training und Consulting. URL: <http://www.aerotechnical.de/infos-news/aviation-glossar-ac.html>. Abrufdatum 03.05.2014.
- [5] ATCC, Part-147 Maintenance Training Organisation DE.147.0013: Aviation Glossar rund um Maintenance Training und Consulting. URL: <http://www.aerotechnical.de/infos-news/aviation-glossar-ac.html>. Abrufdatum 03.05.2014.
- [6] Bundesministerium für Finanzen: Zoll online - Allgemeine Bestimmungen. URL: http://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Zoelle/Statusnachweis/Allgemeine-Bestimmungen/allgemeine-bestimmungen_node.html. Abrufdatum 23.05.2014.
- [7] Unbekannt: Kommunalität. URL: http://fakten-uber.de/airbus_a340-300. Abrufdatum 25.05.2014.
- [8] Lufthansa Technik AG: Im Fokus: Stillgelegte Flugzeuge - Lufthansa Technik AG. URL: <http://www.lufthansa-technik.com/de/maintenance-decommissioned-aircraft>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [9] Sebastian Jeanvré, Christian Duwe: Recycling komplexer Wertstoffe aus Altflugzeugen. Grundlagen und mögliche Handlungsoptionen. In: TK Verlag, Karl J. Thomé-Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 6. Neuruppin 2013, 2013.
- [10] Lilienthal, O.: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegerkunst, 1. Auflage. Berlin 1889.

- [11] Bernd Lukasch: Fliegen wie ein Vogel. Die Idee vom Menschenflug und die Geschichte der Luftfahrt. URL: <http://www.lilienthal-museum.de/olma/soest.htm>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [12] Boeing: Bestellungen und Auslieferungen, Boeing Homepage. URL: <http://active.boeing.com/commercial/orders/index.cfm?content=timeperiodselection.cfm&pageid=m15523>. Abrufdatum 03.08.2015.
- [13] Airbus S. A. S.: Global Market Forecast 2013-2023. Future Journeys, 2013-2023. URL: http://www.airbus.com/company/market/forecast/?eID=dam_frontend_push&docID=33755. Abrufdatum 24.05.2015.
- [14] DLR: Produktlebenszyklen in der Luftfahrt am Beispiel des Airbus A320. URL: http://www.dlr.de/fw/Portaldata/42/Resources/dokumente/pdf_dokumente/5PR_01_LF_Technologieentwicklung.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [15] Bruno Costes: PAMELA, Project description. LIFE05 ENV/F/000059. URL: http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2859&docType=pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [16] Olivier Malavallon: PAMELA-LIFE. Paper "Main Results of the project" 2008.
- [17] Airbus S. A. S.: Training Kit. PAMELA Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft 2008.
- [18] AFRA: Logo. URL: www.afrassociation.org. Abrufdatum 23.05.2015.
- [19] Clean Sky: Homepage. URL: <http://www.cleansky.eu/>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [20] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Horizon 2020. URL: <http://www.forschungsrahmenprogramm.de/kommissionsvorschlag.htm>. Abrufdatum 26.05.2015.
- [21] ENVISA: AIMERE Workshop 2-3 July minutes for participan. 10:00–18:30 on 16/12/2013 and 9:00–11:30 on 03/07/2013, Workshop.
- [22] Umwelt Bundesamt: UFORDAT, Umweltforschungsdatenbank. URL: http://doku.uba.de/aDISWeb/app;jsessionid=5AEF528CC5649F27BCAF1774B21D8C05?service=direct/1/POOLUBAD_43003500_25F84380/syncLink. Abrufdatum 23.05.2015.
- [23] Steinkemper, N.: MORE-AERO - Flugzeugrecycling (Foto: Sebastian Jeanvré, Keske Entsorgung GmbH Braunschweig): Süderelbe AG Metropolregion Hamburg. URL: <http://www.suederelbe.de/flugzeugrecycling.html>. Abrufdatum 06.05.2014.

- [24] Yermani S., Schlager R., Di Giangiacomo D.: Business Models and Policies for End of Life Aircraft Operations. In: Hochschule Pforzheim University (Hrsg.): Hochschule Pforzheim University (Hg.) 11. bis 12. März 2015–Conference Proceedings.
- [25] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32000L0053>. Abrufdatum 19.05.2015.
- [26] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 1257/2013 des europäischen Parlaments und des Rates über das Recycling von Schiffen und zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006 und der Richtlinie 2009/16/EG. Recycling von Schiffen. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:330:0001:0020:DE:PDF>. Abrufdatum 19.05.2015.
- [27] European Parliament and the council of the European Union: Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council waste and repealing certain Directives. Waste and repealing certain Directives. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:en:PDF>. Abrufdatum 19.05.2015.
- [28] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). KrWG. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/krwg/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [29] Europäische Parlament und des Rates: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz). Atomgesetz. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/atg/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [30] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Verordnung über die Nachweisführung bei der Entsorgung von Abfällen. NachwV. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/nachwv_2007/gesamt.pdf.
- [31] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV). AVV. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/avv/gesamt.pdf>. Abrufdatum 20.05.2015.

- [32] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Verordnung über die Überlassung, Rücknahme und umweltverträgliche Entsorgung von Altfahrzeugen (Altfahrzeug-Verordnung - AltfahrzeugV). AltfahrzeugV.
URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/altautov/gesamt.pdf>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [33] Kraftfahrt-Bundesamt: Bestand.
URL: http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html. Abrufdatum 23.05.2015.
- [34] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts. Wasserhaushaltsgesetz. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/whg_2009/gesamt.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [35] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Gefährdung durch explosionsfähige Atmosphären. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=URISERV:c11141&from=DE>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [36] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit. Arbeitsschutzgesetz. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/arbschg/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [37] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Siebtes Buch Sozialgesetzbuch - Gesetzliche Unfallversicherung, SGB 7. URL: http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/sbg_7/gesamt.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [38] Europäische Parlament und der Rat der europäische Union: Gesetz über Betriebsärzte, Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit. Arbeitssicherheitsgesetz. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/asig/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [39] Fraport AG: Einteilung von Flugzeuggruppen – ICAO, AzB08.
URL: <http://blog.umwelthaus.org/2012/08/08/einteilung-von-flugzeuggruppen-%E2%80%93-icao-azb08-fraport-ag/>. Abrufdatum 02.06.2015.
- [40] ICAO: DOC 8643 - Aircraft Type Designators.
URL: <http://www.icao.int/publications/DOC8643/Pages/default.aspx>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [41] Engmann, K.: Technologie des Flugzeuges, 5., neu bearb. Aufl. Würzburg 2009.

- [42] Statista GmbH: Gewicht von Pkw nach Autoherstellern | Statistik.
URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/238004/umfrage/gewicht-von-pkw-nach-autoherstellern/>. Abrufdatum 23.05.2014.
- [43] Annika Abert, Christopher Tappenbeck, Florian Boguth, Michel Hoppe: Quantitative Erfassung nicht mehr flugtüchtiger Flugzeuge nach Muster und Hersteller zur Abschätzung recycling-relevanter Massenströme für die Aufbereitung von End-of-Life-Flugzeugen. Projektarbeit. Clausthal 2012.
- [44] Göhrum, C.: Fahrzeug Lebensdauer. URL: <http://www.autohof-guide.de/fahrzeug-lebensdauer.html>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [45] Bundesministerium der Justiz und Verbraucherschutz: Luftverkehrs-Zulassungs-Ordnung (LuftVZO). LuftVZO. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/luftvzo/BJNR003700964.html>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [46] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Airbus A320-232 D-ATRA. URL: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10203/339_read-277#/gallery/1719. Abrufdatum 22.07.2014.
- [47] Regina Gebhard, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Bild A320-232 D-ATRA DLR, E-Mail (2014).
- [48] Tamas Kolos-Lakatos: Picture of the Cessna 402C aircraft.
URL: <http://www.airliners.net/photo/Cape-Air/Cessna-402C/2128440/L/>.
Abrufdatum 30.05.2015.
- [49] Air Charter Service: Wide-Body Airliners. Extremely Large Aircraft, Long Haul.
URL: http://www.aircharterserviceusa.com/aircraft_guide/wide_body_airliners.html. Abrufdatum 30.05.2015.
- [50] Air Charter Service: Narrow Body Airliners. Large Aircraft, Long Range Flights, Large Group. URL: http://www.aircharterserviceusa.com/aircraft_guide/narrow-body-airliners.html. Abrufdatum 30.05.2015.
- [51] Beuth Verlag GmbH: DIN 9020-2:1983-10, Luft- und Raumfahrt; Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft; Massehauptgruppen und Massebegriffe; Definitionen (1983). <http://www.beuth.de/de/norm/din-9020-2/1063153>, jsessionid=EKMLIW1TXDSS2YIQZIIUPEF.4? URL: 29.05.2015.
- [52] European Commission, (EC) No 2042/2003. On the continuing airworthiness of aircraft and aeronautical products, parts and appliances, and on the approval of organisations and personnel involved in these tasks.

- [53] EASA: CS-25 Large Aeroplanes. URL: <https://easa.europa.eu/certification-specifications/cs-25-large-aeroplanes>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [54] EASA: 14 CFR Part 25 - Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes | LII / Legal Information Institute.
URL: <http://www.law.cornell.edu/cfr/text/14/part-25>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [55] EASA: Continuing Airworthiness Organisations - Part-M Approvals (Foreign CAMO/Subpart G). URL: <https://easa.europa.eu/easa-and-you/aviation-domain/aircraft-products/continuing-airworthiness-organisations/part-m-approvals-foreign-camo-subpart-g>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [56] EASA: Part-145 - Revision August 2012 - Maintenance Organisation Approvals. Consolidated version of Part-145 of the Commission Regulation (EC) No 2042/2003, with related Acceptable Means of Compliance and Guidance Material, including Commission Regulations (EU) No 593/2012 and No 1149/2011 and latest Decisions. URL: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-and-events/technical-publications/part-145-revision-august-2012-maintenance-organisation>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [57] EASA: Part-66 - Certifying Staff. Consolidated version of Part-66 of the Commission Regulation (EC) No 2042/2003 with related Acceptable Means of Compliance and Guidance Material. URL: <https://easa.europa.eu/newsroom-and-events/technical-publications/part-66-certifying-staff>. Abrufdatum 02.06.2015.
- [58] EASA: Continuing Airworthiness Organisations related to Regulation 2042/2003, Annex II - Part 147. Maintenance Training Organisation: Part 147 Approvals (MTOA). URL: <http://easa.europa.eu/easa-and-you/aviation-domain/aircraft-products/continuing-airworthiness-organisations/foreign-part-147-organisations>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [59] Air Transport Association: ATA 100 Chapters. URL: <http://www.s-techent.com/ATA100.htm>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [60] Hünecke, K.: Die Technik des modernen Verkehrsflugzeuges, 1. Aufl. / Stuttgart 1998.
- [61] Jörg Maron, Sky Line Aviation Service GmbH: A-300 Rumpfunterschale mit Z-Profilen (2015).
- [62] Airbus S. A. S.: Structural Repair Manual. A340-200/300, Chapter 53-00-00-001, Pages 11/12 (2012). Abrufdatum 15.01.2014.

- [63] Unbekannt: Großraumjets. URL: <http://muenchen-surf.de/jet/Baueinheit01.htm>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [64] Niu, C.-y.: Airframe structural design. Practical design information and data on aircraft structures. Hong Kong, Los Angeles, Californien 1988.
- [65] Airbus S. A. S.: A330. Structure Repair Manual, SRM, Approved by EASA (2007). Frankreich.
- [66] Lufthansa Technik AG: Leitwerk Airbus A330.
URL: <http://mediabase.lufthansa.com/mediabase/EntryAction.do#>. Abrufdatum 09.05.2015.
- [67] Rickmer Hatecke, Metalloy Metalle-Legierungen GmbH: Triebwerksschrotte, Email (2014). Hamburg.
- [68] MTU Aero Engines AG: Triebwerk V2500.
URL: <http://www.mtu.de/de/maintenance/zivile-maintenance/engine-portfolio-mro/narrowbody-and-regional-jets/v2500/>. Abrufdatum 17.05.2015.
- [69] Hochschule Pforzheim University (Hrsg.): Conference Proceedings, The Second European Aircraft Recycling Symposium 2015.
- [70] Martin Kullmann: Technischer Leitfaden Flugzeugbau. Allgemeines und Interessantes, 9. Auflage. Hamburg Juli, 2003.
- [71] Beuth Verlag GmbH: DIN EN 573-1:2005-02, Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 1: Numerisches Bezeichnungssystem; Deutsche Fassung EN 573-1:2004 (2005).
URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-573-1/76271633>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [72] Beuth Verlag GmbH: DIN EN 573-2:1994-12, Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 2: Bezeichnungssystem mit chemischen Symbolen; Deutsche Fassung EN 573-2:1994 (1994). URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-573-2/2449757>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [73] Krone, K.: Aluminiumrecycling. Vom Vorstoff bis zur fertigen Legierung. Düsseldorf 2000.
- [74] Handbuch Struktur Berechnung. Kapitel 11020-02, Material Eigenschaften, Aluminium und Aluminiumlegierungen, Issue B 2008.
- [75] Subodh K., J. Gilbert Kaufman: Recycling Aluminum Aerospace Alloys.
URL: <http://www.secat.net/includes/open.php?id=4>. Abrufdatum 27.01.2014.

- [76] Amit Joshi, Indian Institute of Technology: Lithium Aluminium Alloy. The new generation Aerospace Alloys.
URL: <http://www.metalwebnews.com/howto/alloys/alloys.pdf>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [77] GDA: Neue Luftfahrtlegierungen sparen Gewicht und senken Produktionskosten.
URL: <http://www.aluinfo.de/index.php/gda-news-de/items/neue-luftfahrtlegierungen-sparen-gewicht-und-senken-produktionsk.html>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [78] Beuth Verlag GmbH: DIN 17600-1:1969-12, Terminologie der Nichteisenmetalle; Oberbegriff, Ordnungsmerkmale, [ACHTUNG: DOKUMENT ZURÜCKGEZOGEN] (1969). URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-17600-1/640770>.
Abrufdatum 30.05.2015.
- [79] DeConcini, B.: Fire-Resistant Materials: Research Overview. This document is available to the U.S. public through the National Technical Information Service (NTIS), Springfield, Virginia 22161.
URL: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar97-99.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [80] Airbus S. A. S.: Aircraft Recovery Manual. A318,A319, A320, A321, ARM. Frankreich 2012.
- [81] Matthias Gründer: Feste Platten mit Wabenkern.
URL: <http://www.flugrevue.de/technik/systeme/innenausstattung-airbus/526142>.
Abrufdatum 30.05.2015.
- [82] Airbus: Aircraft Rescue and Firefighting Charts.
URL: <http://www.airbus.com/support/maintenance-engineering/technical-data/aircraft-rescue-firefighting-charts/>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [83] Airbus: A320 Family: A318, A319, A320, A321 - A320.
URL: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family/>.
Abrufdatum 23.05.2015.
- [84] Jörg Maron, Sky Line Aviation Service GmbH: Flugzeugmechaniker 68€/h, Email (2014).
- [85] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Verordnung (EG) Nr. 2320/2002 zur Festlegung gemeinsamer Vorschriften für die Sicherheit in der Zivilluftfahrt. URL: <http://eur->

- lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:355:0001:0021:DE:PDF. Abrufdatum 23.05.2015.
- [86] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Luftsicherheitsgesetz. LuftSiG. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/luftsig/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [87] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Luftsicherheits-Schulungsverordnung. LuftSiSchulV. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/luftsischulv/gesamt.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [88] eps Splash GmbH: HD Panel | eps.net Europa. URL: <http://www.eps.net/de/bau/produkte/bodenschutz/hd-panel/>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [89] kerscher Schalungsbedarf: Bauzaunelemente. URL: <http://www.kerscher.com/pdf/Baugeraete.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [90] Accura: Zaunblenden mit 65 % Schutzwert nach Maß mit Ösen. URL: <http://www.planen-und-netze.de/pages/mit-oesen.php>. Abrufdatum 12.10.2014.
- [91] Airbus S. A. S.: Aircraft Recovery Manual. ARM. URL: http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/ARM/ARM_A340-200-300.pdf. Abrufdatum 30.05.2015.
- [92] Marana Aerospace Solutions: Commercial Aircraft Storage, Aircraft Maintenance and Aircraft Paint Facilities. URL: <http://maranaaerospace.com/>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [93] Beuth Verlag GmbH: DIN EN 12312-5:2009-08, Luftfahrt-Bodengeräte - Besondere Anforderungen - Teil 5: Betankungseinrichtungen für Luftfahrzeuge; Deutsche Fassung EN 12312-5:2005+A1:2009 (2009). URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-12312-5/117775652>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [94] Flight Safety Australia: Attack of the Fungi. Flight Safety magazine - Sept-Oct 2005 pg50-51. URL: http://www.casa.gov.au/wcmswr/_assets/main/fsa/2005/oct/50-51.pdf. Abrufdatum 03.08.2015.
- [95] Austrian aviation.net: Korean Cargo Boeing 747. URL: <http://www.austrianaaviation.net/feature->

- liste/featuredetail/datum/2009/07/26/korean-cargo-boeing-747.html. Abrufdatum 12.10.2014.
- [96] Ausschuss für Gefahrstoffe - AGS-Geschäftsführung - BAuA: Technische Regeln für Gefahrstoffe 905, Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe. TRGS 905.
URL: file:///C:/Users/Admin/Downloads/TRGS-905.pdf. Abrufdatum 30.05.2015.
- [97] Bahn-Umwelt-Zentrum Konzernstrahlenschutz: Funde radioaktiver Stoffe im Schrottverkehr. URL: <http://www.team-strahlenschutz.de/PDF/INFORMAT.pdf>.
Abrufdatum 14.11.2015.
- [98] Markus Zürcher: Radioaktivität in historischem Material und Bauten der Schweizer Armee. Eine Beurteilung des Kompetenzzentrums Strahle.
URL: <http://www.vtg.admin.ch/internet/vtg/de/home/themen/zsham.parsysrelated1.30518.downloadList.38183.DownloadFile.tmp/radioaktivittinhistorischemmaterialundbautenderschweizerarmeed2013.pdf>. Abrufdatum 14.11.2015.
- [99] Nils Janßen, ACC COLUMBIA Jet Service GmbH: Radioaktive Exit Signs, Email (2013). Hannover.
- [100] Betti, M.: Civil use of depleted uranium.
URL: http://www.pdhealth.mil/downloads/Civil_Use_of_DU.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [101] VMBG: BGI 723, Überwachung von Metallschrott auf radioaktive Bestandteile.
Abrufdatum 27.12.2014.
- [102] EuRec Technology Sales & Distribution GmbH: EuRec® Zerkleinerer S 16.
URL: <http://www.eurec-technology.com/index.php/de/produkte-maschinen/zerkleinerer/eurec-s16.html>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [103] Bundesverband der Deutschen Luft- und Raumfahrtindustrie e.V. (BDLI): Prozess Unbrauchbarmachung. URL: <http://www.bdli.de/suspected-unapproved-parts/images/unbrauchbarmachung.pdf>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [104] Sebastian Jeanvré: Flugzeug-Recycling. Neue Ansätze zur Rohstoffrückgewinnung. URL: http://www.abw-recycling.de/r13/Jeanvre_KESKE_Flugzeug_Recycling_R13.pdf. Abrufdatum 26.11.2015.
- [105] Aircraft Fleet Recycling Association, AFRA: Best Management Practice for Management of Used Aircraft Parts and Assemblies and for Recycling of Aircraft Materials. BMP 3.1. Abrufdatum 15.11.2015.

- [106] Airbus S. A. S.: List of Radioactive and Hazardous Elements. LRE, LRE Rev 133 2002.
- [107] Boeing: Use of Depleted Uranium as Weights in Commercial Airplanes 1998.
- [108] Airbus S. A. S.: Aircraft Rescue and Fire Fighting Chart. ARFC, A340-200/300.
URL: http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/tech_data/ARFC/ARFC_A340-200-300_Jan14.pdf. Abrufdatum 15.11.2015.
- [109] Lufthansa Technik AG, C.: Kostenanahme Ferry Flight, Email (2014). Hamburg.
- [110] Nieto Silleras Sandro: Liste der Luftfahrtunternehmen deren gesamter Betrieb in der EU untersagt ist. URL: http://ec.europa.eu/transport/modes/air/safety/air-ban/doc/list_de.pdf. Abrufdatum 18.02.2014.
- [111] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV, German Insurance Association): Containerhandbuch.
- [112] Europäische Parlament und der Rat der europäischen Union: Richtlinie 96/53/EG des Rates zur Festlegung der höchstzulässigen Abmessungen für bestimmte Straßenfahrzeuge im innerstaatlichen und grenzüberschreitenden Verkehr in der Gemeinschaft sowie zur Festlegung der höchstzulässigen Gewichte im grenzüberschreitenden Verkehr. URL: <http://www.euro-combi.de/dwl/EU-Richtlinie%2096-53.pdf>. Abrufdatum 23.05.2015.
- [113] Beuth Verlag GmbH: DIN ISO 668:1999-10, ISO-Container der Reihe 1 - Klassifikation, Maße, Gesamtgewichte (ISO 668:1995), [ACHTUNG: DOKUMENT ZURÜCKGEZOGEN] (1999). URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-iso-668/17334094>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [114] Beuth Verlag GmbH: DIN 15190-102:1991-04, Frachtbehälter; Binnencontainer; Geschlossene Bauart (1991). URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-15190-102/1673465>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [115] Marc Keske, Kay Osteroth, Keske Entsorgung GmbH: Mobile Einheit Altflugzeugrecycling Keske Entsorgung GmbH, E-Mail (2015).
- [116] Dietrich Klindworth, VeerSail Gesellschaft für industrielle Fertigung mbh: Darstellung Containereinheit Vorzerkleinerung, Trockenlegung und Schadstoffentfrachtung, E-Mail.
- [117] Arne Müller, STUTE Logistics (AG & Co.) KG: Logistikkonzept, Email (2014). Bremen.

- [118] Arne Müller, STUTE Logistics (AG & Co.) KG: Logistisches Prozessfließbild für die mobile Einheit und den Sekundärrohstoffes des Altflugzeugs, Email (2014). Bremen.
- [119] Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis AVV). Abfallverzeichnis-Verordnung
Ausfertigungsdatum: 2001.
- [120] Beschluss des Rates C(2001)107/endgültig über die Kontrolle von grenzüberschreitenden Verbringungen von Abfällen zur Verwertung.
- [121] Umweltbundesamt, Basler Übereinkommen über die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihrer Entsorgung 1989.
- [122] Zoll: Zollltarifnummer 76020090.
URL: http://www.zollltarifnummern.de/2015_de/76020090.html. Abrufdatum 23.05.15.
- [123] BDSV: Praesentation Edelstahlrecycling.
URL: http://www.bdsv.org/downloads/BDSV_Praesentation_Edelstahlrecycling_kurz.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [124] BDSV: Anlagenwegweiser: Schredderanlagen in der Bundesrepublik Deutschland. URL: http://www.bdsv.org/downloads/fas_map.pdf. Abrufdatum 23.05.2015.
- [125] Prof. Dr. Daniel Goldmann: Altfahrzeug-Recycling 3 und Erweiterung auf andere Stoffströme. Shredder, Shredder-Peripherie Technologien und die Stahlschrottroute. Clausthal SS 2014.
- [126] Prof. Dr. Daniel Goldmann: Verwertung von Sekundärrohstoffen. Abschnitt1: Metalle (Fe,Al, Cu), Vorlesungsschrift. Clausthal WS 2014/2015.
- [127] Beuth Verlag GmbH: DIN EN 13920-1:2003-08, Aluminium und Aluminiumlegierungen - Schrott - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Probenahme und Prüfungen; Deutsche Fassung EN 13920-1:2003 (2003).
URL: <http://www.beuth.de/de/norm/din-en-13920-1/58862761>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [128] Boeing: Boeing Deutschland - 787 Dreamliner.
URL: <http://www.boeing.de/Produkte-Dienstleistungen/Boeing-Commercial-Airplanes/787-Dreamliner>. Abrufdatum 29.04.2014.
- [129] Owada, S.; Tsuchiya, K.; Takasugi, A.; Kato, Y.; Funakoshi, T.; Tanno, H.: Entscheidende Kombination. Aluminiumschrott 2012.

- [130] David Strauss: Presentation to PNAA. Wall Street View of OEM Cycle.
URL: <http://pnaa.net/events/other-events/82-events/304-2014-conference-presentations>. Abrufdatum 30.05.2015.
- [131] TARMAC AEROSAVE: Homepage.
URL: http://www.tarmacaerosave.aero/index.php?option=com_content&view=article&id=20&Itemid=120&lang=en. Abrufdatum 30.04.2015.
- [132] Bureau of International Recycling: Was tun bei ungewollter Radioaktivität im Metallschrott.
URL: <http://www.bir.org/assets/Documents/publications/Posters/RadioactivityPosterDEHiRes.pdf>. Abrufdatum 03.08.2015.
- [133] Pratt & Whitney: Environmental Leadership. Our commitment to the environment starts at the top. - See more at:
http://www.pw.utc.com/Environmental_Leadership#sthash.qCH7XEG5.dpuf.
URL: http://www.pw.utc.com/Environmental_Leadership. Abrufdatum 04.01.2015.
- [134] Airbus S. A. S.: Global Market Forecast 2009 - 2028.
URL: <http://de.slideshare.net/agromera/airbusglobalmarketforecast-2009-2028>.
Abrufdatum 24.05.2015.
- [135] Rickmer Hatecke, Metalloy Metalle-Legierungen GmbH: Preisanfrage Aluminium, Email (2014). Hamburg.
- [136] BGR, A. B.: Rohstoffwirtschaftlicher Steckbrief - Aluminium (2013).
URL: http://www.deutscherohstoffagentur.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_al.pdf?__blob=publicationFile&v=8. Abrufdatum 04.01.2015.
- [137] Indextmundi: Aluminum - Monthly Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News - IndexMundi.
URL: <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=aluminum&months=360>. Abrufdatum 06.01.2015.
- [138] Nina Brose, Keske Entsorgung GmbH: Preisabfrage Schrotte, Email (2014). Braunschweig.
- [139] Indextmundi: Nickel - Monthly Price - Commodity Prices - Price Charts, Data, and News - IndexMundi.

URL: <http://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=nickel&months=360>. Abrufdatum 06.01.2015.

[140] FlorianDrexler: Aircraft Teardown: An integrated Product Evaluation Methodology for Lufthansa Technik. Lufthansa Technik AG.

[141] Bill Carberry: First European Aircraft Recycling Symposium. Stuttgart 13. Dezember.2013.

[142] Marc Erich Keske, Keske Entsorgung GmbH: Kosten Rückbau Leipzig, Mündlich (2015).

[143] Palt, K.: Boeing 747-400 - Technische Daten / Beschreibung.

URL: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_7474_dt.php. Abrufdatum 24.05.2015.